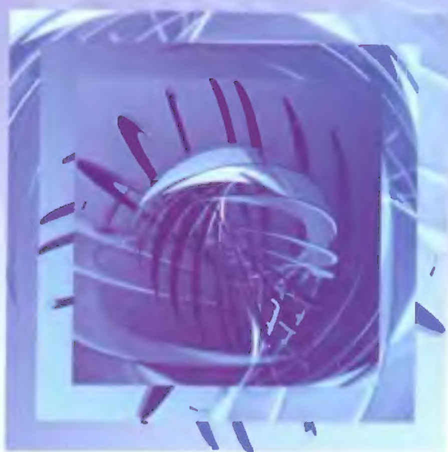
А. П. Сердешнов

# РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

## ремонт электрических машин

часть 1



Минск 2008

А. П. Сердешнов

# РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

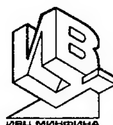
В 2 частях

Часть 1

# РЕМОНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для студентов энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования*

Второе издание




Минск
«ИВЦ Минфина»
2008

УДК 621.31.004.67(075.8)
ББК 31.26я73
С32

Рецензенты:

кафедра электроснабжения энергетического факультета БНТУ (кандидат технических наук, доцент *В.В. Павловец*); директор Института энергетики АПК НАН Беларуси доктор технических наук, профессор *В И Русан*

**Сердешнов, А.П.**

С32 Ремонт электрооборудования. В 2 частях. Часть 1. Ремонт электрических машин: 2-е изд.: учеб. пособие для студентов энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / А.П.Сердешнов. — Минск: ИВЦ Минфина, 2008. — 293 с.: 111 ил.

ISBN 978-985-6847-57-1 (ч. 1).
ISBN 985-6782-35-X.

Освещаются основные вопросы учебной программы по ремонту электрических машин, содержатся краткие сведения по электротехническим материалам, используемым при ремонте, технологии ремонта и расчетам.

Книга предназначена для студентов высших учебных заведений, учащихся колледжей, слушателей системы профессионально-технического образования, может быть полезной для инженеров, занимающихся ремонтом и эксплуатацией электрооборудования, в качестве справочного пособия для высококвалифицированных рабочих.

**УДК 621.31.004.67(075.8)**
**ББК 31.26я73**

**ISBN 978-985-6847-57-1 (ч. 1)**
**ISBN 985-6782-35-X**

# Введение

Цель изучения дисциплины «Ремонт электрооборудования» — теоретическая и практическая подготовка студентов к самостоятельной творческой инженерной деятельности по ремонту электрических машин и аппаратов. Они должны освоить технологии ремонта для различных видов электрического оборудования; ознакомиться с видами ремонтных предприятий; требуемыми станками, приспособлениями, инструментами, приборами и пр.; их устройством и применением; научиться правильно использовать электротехнические материалы; освоить расчеты, проводимые при ремонте конкретных изделий; выполнять испытания отремонтированного оборудования; знать требования Правил устройства электроустановок (ПУЭ) и Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ) в области ремонта.

Проработав все разделы курса «Ремонт электрооборудования», студент должен уметь грамотно выполнять дефектацию и оценивать состояние электрического оборудования и его деталей; находить эффективные решения вопросов их ремонта с учетом технико-экономической целесообразности; пользоваться технической, справочной и нормативной литературой. Он должен приобрести навыки по выполнению ремонтных операций.

От четких и полных знаний инженером-электриком работ по ремонту электрооборудования во многом зависит на производстве надежная и качественная работа электрических машин и аппаратов.

К настоящему времени электротехнической практикой накоплен достаточно большой опыт выполнения ремонтных работ. Они проводятся в мелких мастерских и на крупных специализирован-

ных заводах. Каждое из этих предприятий имеет особенности, достоинства и недостатки, отражающиеся на качестве отремонтированных машин и аппаратов. При этом себестоимость ремонта в них также разная. Как правило, на крупных предприятиях она меньше, но стоимость транспортировки и перерыв в использовании механизированного оборудования в хозяйстве могут дать такие материальные потери, при которых ремонт в мелких мастерских будет более экономичным. Инженер-электрик должен уметь разумно оценивать сложившуюся ситуацию и выбирать оптимальные решения.

*Ремонтом электрооборудования* называется совокупность технологических операций по восстановлению работоспособности и ресурса электрических машин и аппаратов или их составных частей.

*Операция (работа)* — любой производственный процесс, который заканчивается событием. *Событие* — результат проделанной работы.

*Работоспособностью* называют состояние объекта, при котором он способнен выполнять заданные функции с параметрами, установленными нормативной документацией.

*Ресурс* — суммарная наработка до *предельного состояния*, под ним понимается такое состояние изделия, при котором восстановление его работоспособности невозможно, т.е. оно неремонтопригодное. *Ремонтопригодность* — состояние изделия, чья работоспособность может быть восстановлена техническим обслуживанием или ремонтом.

*Наработка* — продолжительность работы или ее объем, произведенный объектом. Следовательно, она может измеряться в единицах времени, количеством изделий или выполненных операций. *Наработка на отказ* — средняя продолжительность работы между отказами.

*Отказ* — событие, связанное с неспособностью объекта выполнять заданные функции. Его не следует путать с *неисправностью*, т.е. состоянием оборудования, при котором оно не соответствует хотя бы одному из технических требований работоспособности.

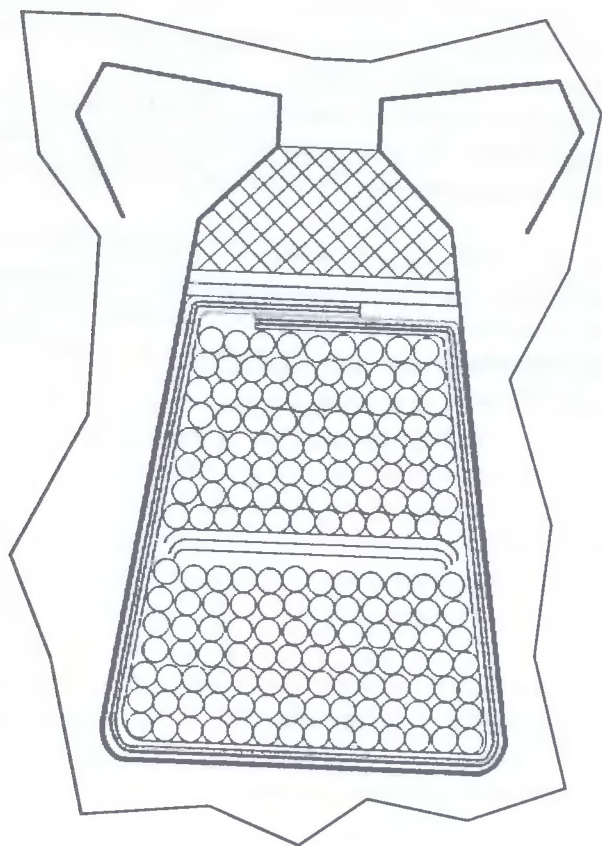
Под *ремфондом* понимается отказавшее или неработоспособное ремонтопригодное электрооборудование.

В соответствии с ПТЭ и ППРЭсх виды ремонтных работ, электрооборудования, используемого в сельском хозяйстве, разделяют на техническое обслуживание и ремонт, последний — на текущий и капитальный.

*Техническим обслуживанием* называют объем ремонтных операций, направленных на обеспечение и поддержание работоспособности электрооборудования.

*Текущим ремонтом* называется объем ремонтных операций по обеспечению или восстановлению работоспособности изделий путем восстановления или замены его отдельных узлов и деталей.

*Капитальным ремонтом* называется объем ремонтных операций, восстанавливающий работоспособность объекта с ресурсом, равным или близким к новому изделию. Как правило, он заключается в восстановлении или замене любых его деталей и узлов, в том числе и базовых.



## Раздел первый

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РЕМОНТЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В ремонтной практике так же, как и вообще в электротехнике, электротехнические материалы по их использованию делят на группы:

- *проводниковые* — применяются в качестве токоведущих частей электрических машин, аппаратов и приборов; проводов и кабелей линий электропередач, шин, обмоточных, монтажных проводов, проволок, нагревательных элементов и пр.;
- *полупроводниковые* — в выпрямительных устройствах, реле, в схемах автоматических установок и т.п.;
- *магнитные* — для создания пути магнитному потоку в магнитных системах всех изделий, работающих с его помощью: магнитопроводы электрических машин, трансформаторов, реле, измерительных приборов и т.д.;
- *изоляционные (диэлектрики)* — во всех видах электрооборудования, в качестве материалов, ограничивающих протекание электрического тока и в качестве защиты от повышенного потенциала.

К *материалам специального назначения* относят материалы конструкционные, термопар, аккумуляторные электролиты, электроугольные изделия и т.п.

# Глава 1. Проводниковые материалы

По агрегатному состоянию они делятся на газообразные жидкие и твердые. В ремонте электрооборудования наиболее распространены последние. По сопротивлению, протекающему электрическому току их обычно делят на материалы с малым и высоким удельным сопротивлением.

## 1.1. Материалы с малым удельным сопротивлением

Их используют для токоведущих частей электрического оборудования, где требуется высокая проводимость (обмотки, провода линий электропередач и т.п.). Наибольшее применение для этих изделий получили медь и алюминий, а также их сплавы: латунь, бронзы и пр.

*Медь* — металл с характерным красноватым цветом. Ее достоинства: высокая проводимость (уступает только серебру), достаточно большая механическая прочность, хорошая устойчивость к окислению (коррозии), она относительно легко обрабатывается, сваривается, паяется.

В электротехнике используется в основном только электролитическая медь марок М 1 и М 0. Первая из них (М 1) содержит не более 0,1 % примесей (при этом кислорода не более 0,08 %, так как он резко ухудшает механические свойства меди), вторая — М 0 — не допускает примесей более 0,05 % (в том числе кислорода — 0,02 %), из нее делается самая тонкая проволока.

Стандартная медь имеет плотность 8890 кг/м$^3$ (при 20°С), удельное сопротивление $\rho$ = 0,0172 мкОм·м (при 20°С), удельную проводимость 58 МСм·м (при 20°С), температуру плавления — 1083°С.

По механическим свойствам медь делят на два вида: твердую и мягкую. Твердая, благодаря наклепу (марка МТ), создается холодной протяжкой меди, используется для проводов линий электропередач, шин, изготовления коллекторов и т.п. Мягкая (марка ММ) получается отжигом твердой меди при температуре 330–350°С, применяется для изготовления обмоточных и других проводов, где требуется большая гибкость.

*Латунь* — сплав меди, в основном с цинком. *Достоинства:* дешевле меди, прочнее ее, тверже, обладает большей пластичностью, поэтому лучше штампуется и вытягиваются как в холодном, так и в горячем состоянии. С ростом содержания цинка (до 45 %) предел прочности при растяжении возрастает.

Свойства латуней зависят от марок, граничные значения: плотность 7900–8500 кг/м$^3$, удельное сопротивление $\rho$ = 0,043–0,326 мкОм·м (при 20°С), температура плавления — 960–1200°С.

Они используются для изготовления токоведущих деталей, как правило, сложной конфигурации, от которых требуется повышенная твердость и стойкость к действию электрических разрядов: пружинящие контакты и прочие подобные изделия.

*Бронзы* — сплавы меди с оловом, хромом и другими химическими элементами, кроме цинка и никеля. Достоинства по сравнению с медью: повышенная механическая прочность, стойкость к истиранию, твердость, упругость. Свойства бронз так же, как и латуней, зависят от марок, вместе с тем удельное сопротивление всех бронз выше, чем у чистой меди.

Использование бронз для токоведущих деталей электрооборудования — самое разнообразное в зависимости от условий их работы. Например, кадмиевые бронзы широко применяются для коллекторных пластин и даже контактных проводов в особо ответственных случаях. Бериллевые бронзы обладают повышенной стойкостью к истиранию. Хромовая бронза при высокой проводимости имеет хорошую механическую прочность.

*Алюминий* — металл серебристо-белого цвета. Его достоинство в том, что при малой по сравнению с медью плотностью он имеет достаточно большую проводимость. К тому же он дешевле и более доступен. Роль алюминия как заменителя меди все больше возрастает. Вместе с тем алюминиевый провод по сравнению с медным при той же длине и равном сопротивлении сечение имеет на 65 % (диаметр на 28 %) больше, однако по массе он в два раза легче. Алюминий — материал пластичный, устойчивый к окислению (коррозии), хорошо протягивается, штампуется, куется, но при обработке резанием, фрезеровании, опиловке из-за мягкости требует выполнения специальных мер.

В зависимости от марки содержание чистого алюминия колеблется от 99,0 (А0) до 99,99 % (А999). При этом чем меньше примесей, тем больше проводимость, но ниже механическая прочность и пластичность.

Алюминий, широко используемый в электротехнике, имеет плотность 2703 кг/м$^3$ (при 20°С и содержании примесей 0,003–0,004 %), удельное сопротивление $\rho = 0,028$ мкОм·м (при 20°С), удельную проводимость — 38 МСм/м (при 20°С), температуру плавления 657°С

По механическим свойствам алюминий, как и медь, делят на твердый и мягкий. Твердый, благодаря наклепу (марка АТ), производится холодной протяжкой алюминия, применяется для проводов линий электропередачи и др. изделий. Мягкий (марка АМ) получается отжигом АТ при температуре 350–400°С, используется для изготовления обмоточных, монтажных проводов и других изделий, где требуется гибкость, мягкость и т.п. Однако в производстве большее применение, чем чистый алюминий, получили его сплавы.

## 1.2. Изделия с малым удельным сопротивлением

Рассмотренные материалы являются основой различных электротехнических изделий: проводов, шин, лент и пр. Особенно важны в ремонте электрического оборудования провода и кабели, поэтому изучим их более подробно.

*Обмоточные провода* — проволока с особо тонкой изоляцией при повышенной электрической и механической прочности. Выпускаются они круглого и прямоугольного сечения.

В ремонтной практике в основном используются обмоточные провода с медной и алюминиевой жилой. Если в марке перед буквой «П» стоит буква «А» (АПБ) — жила провода алюминиевая, если «А» не стоит (ПБ) — жила медная.

Кроме того, марка характеризует изоляцию обмоточного провода, которая может быть: волокнистой (ПБД), эмалевой (ПЭВ), комбинированной (ПЭВШО), вместе с тем органической (например, хлопчатобумажной) и неорганической (например, стекловолокнистой).

*Волокнистые изоляции проводов* (ПБД, АПББО, ПШД и др.), как правило, обладают относительно повышенной механической, но относительно малой электрической прочностью, что объясняется наличием воздуха в порах. Обмоточные провода с такой изоляцией по сравнению с эмалевой имеют большую толщину, но они намного дешевле других.

*Эмалевая изоляция проводов* (ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВТЛ и др.) при малой толщине обладает повышенной электрической прочностью. Провода предназначены для массового использования в обмотках

электрических машин и трансформаторов. В зависимости от класса нагревостойкости рекомендуются марки:

- класс *A* и *E* — ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭТВЛ-1 и ПЭТВЛ-2. Из них марки проводов ПЭВ и ПЭМ по электроизоляционным и физико-механическим характеристикам практически равноценны и не требуют дополнительного слоя волокнистой изоляции. Провода марки ПЭМ более устойчивы к трансформаторному маслу, их можно рекомендовать также для обмоток электромашин холодильных установок; марки проводов класса *E*: ПЭТВЛ-1 и ПЭТВЛ-2 целесообразно использовать только для обмоток электродвигателей малой мощности;
- класс *B* — ПЭТВ, ПЭ-939, ПЭТВ-ТС, их недостаток — пониженная стойкость к кратковременным тепловым перегрузкам;
- класс *F* — ПЭТ-155, ПЭТМ, ПЭФ-155. Из них наибольшее применение в электрических машинах получила марка ПЭТ-155, так как обладает хорошими электроизоляционными свойствами и устойчивостью к тепловым ударам, но механические характеристики ее ниже, чем, например, у марки ПЭТМ. Марка ПЭФ-155 имеет повышенную стойкость к пониженным температурам.

Слабая механическая прочность изоляции многих эмалированных проводов (например, ПЭЛ, ПЭВ и др.) потребовала усиления ее за счет наложения поверх эмалевой пленки слоя волокнистой изоляции (ПЭЛБО, ПЭВШО и др.). В том случае, если нити не удерживаются на эмали, их подклеивают лаком.

*Комбинированная изоляция проводов* (эмали с нитью) сочетает положительные качества проводов эмалированных и с волокнистой изоляцией. Но обычно толщина их больше и они дороже. Массовое применение для изготовления обмоток электрических машин получили провода со стекловолокнистой изоляцией ПСД (АПСД), ПСДК — два слоя стеклянных нитей, пропитанных соответственно глифталевым и кремнийорганическим лаками, классы нагревостойкости первых — *F*, вторых — *H*. Широко распространены также провода с комбинированной изоляцией и с уменьшенной ее толщиной ПСДТ, ПСДКТ и, наконец, провода с лакированной поверхностью ПСД-Л, ПСДК-Л.

*Силовые и установочные провода* с резиновой и пластмассовой изоляцией применяются для распределения электрической энергии в силовых и осветительных сетях. Они используются на открытом воздухе и в закрытых помещениях, могут прокладываться открыто, в трубах и под слоем штукатурки. Предназначены для работы с температурой, °С: жил +65, окружающего воздуха +25, земли +15. При теплостойкой резине на основе бутилкаучука температура работы провода допускается до +85°С, с кремнийорганической — до +180°С. Провода изготавливаются для номинальных напряжений на 380, 660 и 3000 В.

*Провода с резиновой изоляцией.* ПРН, АПРН имеют медные и алюминиевые жилы с резиновой изоляцией и дополнительной негорючей резиновой оболочкой. Они в основном используются при прокладке в сырых и сухих помещениях, а также на открытом воздухе.

ПРГИ — провод с медной, гибкой жилой, с резиновой изоляцией, обладающей защитными свойствами. Используется при прокладке, где требуется повышенная эластичность, при монтаже соединений подвижных частей электрических машин в сухих и сырых помещениях.

АППР — провод с алюминиевой жилой и резиновой изоляцией, не распространяющей горение, применяется для прокладки в жилых и производственных зданиях, в частности, животноводческих помещениях.

Для осветительных сетей в сухих и сырых помещениях используются медные провода марки ПРД в непропитанной оплетке, двухжильные и скрученные.

*Провода с пластмассовой изоляцией.* АПВ — жила алюминиевая с поливинилхлоридной изоляцией, применяется для монтажа силовых и осветительных цепей в машинах и станках, в трубах, несгораемых строительных конструкциях; ПВ1 — то же, но с медной жилой; ПВЕ — то же, но с гибкой медной жилой, используется в основном для гибкого монтажа при скрытой и открытой прокладках. АВТ — провод с алюминиевыми жилами и изоляцией из поливинилхлоридного пластика с несущим тросом для наружной прокладки (например, в жилые дома или хозяйственные постройки в

сетях 380 В, в I-м и II-м районах гололедности. ДВТУ — то же, но с усиленным несущим тросом для III-го и IV-го районов гололедности. Применяются для прокладки в животноводческих помещениях.

*Провода силовые гибкие* (нагревостойкие) используются для выводов электродвигателей. Марки ПВБЛ и РКГМ имеют медные жилы, резиновую изоляцию, но первая из них выполнена на основе бутилкаучука, в оплетке лавсановой нитью, вторая – из кремнийорганической резины, в оплетке из стекловолокна, пропитанной эмалью или термостойким лаком.

*Соединительные шнуры* служат для подключения питания от электрической сети до различных видов бытовых токоприемников: электрических машин, телевизоров, нагревательных приборов и т.п. Допустимая рабочая температура нагрева: при резиновой изоляции +65°С, при поливинилхлоридном пластике +70°С, номинальное напряжение — до 660 В.

По исполнению шнуры разделяют на: плоские без оболочки (ШПП, ПВП-1, ШВП-2), круглые без оболочки (ШВПТ), легкие с оболочкой (ШВВП, ШВЛ), обычные с оболочкой (ШРО, ШРС и др.).

*Монтажные провода* предназначены для электрических соединений в аппаратах, приборах и других электрических устройствах, а также схемах. Они делятся по нагревостойкости на обычные (МВ, МП, МВКЭ) и повышенной стойкости (МКР, МКТП, МПО), причем за основу берется наиболее нагретая точка в проводе. Жилы медные, у многих марок луженые, одно- и многопроволочные, изоляция: резина, поливинилхлоридный пластик, полиэтилен. Повышение механической прочности изоляции выполняется путем дополнительной оплетки (например, капроновой нитью, в марке ставится буква К), делается и экранирование в виде оплетки из медного провода (в марке — Э). Номинальное напряжение 500, 1000 В для обычных проводов и 2, 2,5 и 4 кВ для высоковольтных монтажных проводов типа ПВМП-2. Рабочая температура для обычных — до +70°С, с поливинилхлоридной изоляцией — до +85°С, с повышенной нагревостойкостью — от +85 до +150°С.

*Неизолированные провода* нашли массовое применение в воздушных линиях электропередач. Они изготавливаются из меди

(одной или нескольких скрученных проволок (марка М)), алюминия (несколько скрученных проволок (А, Ап)), алюминиевых сплавов (АН, АЖ). Для повышения механической прочности алюминиевых проводов их укрепляют стальными сердечниками (сталеалюминиевые провода марок АС, АпС).

Провода марок А, Ап, АС, АпС, АН, АЖ рекомендуются для использования в сельской, лесной, горной местности, допустимы в атмосфере промышленных районов; марки М — в атмосфере морской местности, а также и в промышленных районах.

*Кабели* служат для передачи энергии в электрических линиях. Они представляют собой изолированные друг от друга токопроводящие жилы с общей изоляцией, могут иметь свинцовую или алюминиевую оболочку и броню из стальных лент или из круглых оцинкованных стальных проволок, поверх которых накладывается защитный покров. Жилы выполняются одно- и многопроволочные из меди или алюминия. Изоляция делается бумажной с пропиткой составами, резиновой, пластмассовой.

По применению кабели делятся на силовые (для электроснабжения токоприемников (АВВГ, АСГ, ААГ)), контрольные (для подведения маломощных, низковольтных, управляющих сигналов к техническим устройствам и снятия информации (КРСГ, АКРВГ)), управления, отличающиеся от контрольных только конструкцией для соответствующих условий (КРШУ, КУПР), монтажные, назначение которых то же, что и монтажных проводов (КМПВ, КМПЭВ).

По напряжению они подразделяются на низковольтные с номинальным напряжением до 1 кВ и высоковольтные с номинальным напряжением 1, 6, 10, 20, 35 и более кВ.

*Контакты* — самая уязвимая часть электрических сетей, они служат для периодического надежного замыкания и размыкания цепей. В процессах выполнения указанных операций они подвергаются воздействию электрической искры или дуги, что вызывает эрозию поверхностей, подгорание, даже приваривание друг к другу и т.п. Отсюда требования к контактным материалам: высокая электропроводность, тугоплавкость, твердость, хорошая устойчивость к истиранию и воздействию дуги. Для изготовления контак-

тов кроме чистых тугоплавких металлов широко распространены специальные сплавы, в которые входят серебро, кобальт, медь, бериллий, никель, хром, молибден, вольфрам, кадмий. К контактным изделиям относятся щетки.

*Припои.* Это специальные материалы, расплавляемые в месте соединений деталей или в целях защиты от окисления для их покрытия. По температуре плавления припои делят на мягкие и твердые, отличаются они также по механическим характеристикам.

- *Мягкие припои* имеют температуру плавления до 400°С. Применяются там, где от соединений требуется в основном лишь хороший электрический контакт, поскольку механические качества таких соединений относительно невысоки. Кроме того, мягкие припои широко используют при лужении для защиты основного материала от окисления или для получения хорошего контакта при холодном соединении токоведущих частей (например, в местах соединений сборных шин).

В качестве мягких припоев используют олово, его сплавы со свинцом — ПОС-18 и др. (цифра показывает содержание олова в припое — 18 %). Чем больше олова, тем выше температура плавления и жидкотекучесть. Есть мягкие припои с добавками алюминия, серебра. Особой легкоплавкостью (с пониженной температурой плавления) отличаются припои, в которые входят кадмий и висмут.

- *Твердые припои* имеют температуру плавления более 500°С. Применяются там, где от соединения требуется не только хороший контакт, но и высокие механические характеристики.

В качестве твердых припоев чаще всего используются сплавы: медно-фосфорные (ПМФ), медно-цинковые (ПЦ), серебряные (ПСр). Последний из них дает наилучший электрический контакт, но он и самый дорогой.

*Флюсы* — материалы с повышенной способностью к растворению окислов металлов и других загрязнений. Кроме того, у них пониженная температура плавления (значительно ниже припоя) и плотность, что позволяет им быстро всплывать на поверхность расплава и образовывать на нем надежную защиту (пленку) от окисле-

ния. Эти материалы также способны уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя.

Такие материалы используются при пайке, сварке и лужении. Только под их слоем возможно получение высококачественных соединений с хорошими электрическими и механическими характеристиками.

В электротехнике в качестве флюсов для мягких припоев массово применяют канифоль и смеси на ее основе, для твердых — буру.

Флюсы на основе соляной и фосфорной кислот можно использовать только там, где они не могут вызвать ускоренного разрушения изоляции или окисления металлов.

## 1.3. Материалы высокого сопротивления

Для различных электронагревательных и электроизмерительных приборов, реостатов (пусковых, нагрузочных и пр.), где требуется высокое сопротивление, употребляются специальные сплавы.

В зависимости от применения к ним предъявляются специфические требования.

Например, от материалов, используемых в измерительных приборах, требуется: высокое удельное электрическое сопротивление (от этого зависят размер и масса приборов), малый температурный коэффициент удельного сопротивления (для обеспечения стабильности электрического сопротивления прибора), достаточная стабильность удельного сопротивления во времени, малая удельная термо-ЭДС в паре с медью (иначе растет ошибка измерений), хорошая обрабатываемость.

К этим материалам относится, например, сплав на основе меди с марганцем — *манганин*, марок МНМц3-12 и МНМцАЖ3-12-0,3. Их удельное сопротивление в отрезке температур от -100 до +100°С меняется крайне мало. Массовое применение в электротехнике получил также сплав медно-никелевый — *константан*, марки МНМц40–1,5, его удельное сопротивление практически не зависит от температуры. Для контактных пружин, реостатов и т.п. широко используют другой медно-никелевый сплав — *нейзильбер*.

Иные требования предъявляются к материалам для электронагревательных приборов. Они длительно работают при температурах около 1000°C в воздушной среде. Поэтому от них, кроме высокого сопротивления, требуется также повышенная жаростойкость (т.е. способность работать, не разрушаясь при высоких температурах в воздухе или других газообразных средах). В настоящее время для этих целей широко применяют *хромоникелевые и хромоалюминиевые сплавы*. Первые из них отличаются большей жаропрочностью, но они дорогие, вторые — намного дешевле, но более тверды и хрупки.

# Глава 2. Полупроводниковые материалы

Эти материалы имеют удельную электропроводимость ниже, чем проводниковые материалы, но выше, чем диэлектрики. В ремонтной практике электрооборудования чаще всего используются такие полупроводниковые материалы, как кремний, германий, селен и значительная группа карбидов, сульфидов, окислов металлов.

*Кремний* — элемент кристаллического строения, имеет кубическую решетку типа алмаза. В последнее время, несмотря на сложность получения, это основной материал для изготовления полупроводниковых изделий, таких как диоды, транзисторы, фотоэлементы, а также во многих схемах микроэлектроники. Рабочая температура кремния достигает 120–200°C, это намного выше, чем, например, у германия.

*Германий* — элемент, получаемый для практического использования в виде монокристаллов методом вытягивания из расплава. Широко применяется для изготовления выпрямителей переменного тока до самых больших мощностей, транзисторов, фототранзисторов, фоторезисторов и пр. Германий очень чувствителен к влажности воздуха и требует соответствующей защиты. Рабочая температура — от –60 до +70°C.

*Селен* используется для изготовления выпрямителей и фотоэлементов. В последнее время его все больше вытесняют в производстве другие полупроводниковые материалы.

*Карбид кремния,* из него, в частности, изготавливаются нелинейные сопротивления, называемые варисторами. При скреплении зерен SiC глинистой связкой получается *тирит,* а жидким стеклом — *вилит*, используются для производства разрядников.

*Сульфиды* применяются для изготовления фотосопротивлений (фоторезисторов), а также для люминофоров (в люминесцентных лампах).

*Оксиды* — гемиоксид меди, диоксид титана, оксид цинка и пр. используют при производстве, например, термисторов и фоторезисторов:

*термисторы* (термосопротивления, резко меняющие удельное сопротивление при изменении температуры) применяются в различных схемах автоматики для температурной компенсации, в качестве датчиков встроенной защиты и т.п.;

*фоторезисторы* (фотосопротивления, меняющие удельное сопротивление от величины освещенности) используют для подсчета деталей на конвейере, при контроле уровней сыпучих тел, жидкостей и в других устройствах автоматики.

# Глава 3. Магнитные материалы

На производстве все магнитные материалы по применению (которое связано с их свойствами) делят на две большие группы: магнитомягкие и магнитотвердые.

## 3.1. Магнитомягкие материалы

Эти материалы характеризуются высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой, относительно небольшими потеря-

ми на гистерезис. Их широко используют для изготовления магнитопроводов электрических машин, трансформаторов и других изделий.

Наиболее распространенными магнитомягкими материалами являются железо и электротехнические стали.

*Железо* технически чистое содержит, хоть и в малых количествах, углерод, кремний, марганец, серу и другие элементы, которые ухудшают его магнитные качества. В чистом виде используется очень редко.

*Электротехническая сталь* отличается от других тем, что она легирована кремнием (Si). Он резко повышает электрическое сопротивление стали, следовательно, резко понижает величину вихревых токов и потери от них. Кремний также раскисляет сталь, что увеличивает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу и потери на гистерезис. Однако при содержании в стали Si более 5 % у нее значительно падают механические характеристики (в первую очередь, растет хрупкость).

Магнитные свойства стали (удельные потери мощности на гистерезис и вихревые токи в Вт/кг, намагничивающая мощность в В·А/кг) получают экспериментально. Для расчетов эти данные сведены в таблицы ГОСТов, справочников и т.д.

Методом специальной прокатки и термической обработки изготавливается текстурованная сталь с кристаллами, оси которых ориентированы в направлении прокатки. Магнитные свойства (главное — магнитная проницаемость) вдоль осей этой стали в несколько раз выше, чем в сталях, не подвергавшихся такой обработке.

Электротехническая сталь производится заводами-изготовителями в виде листов, рулонов, резаной ленты толщиной 0,1; 0,2; 0,35; 0,5 и 1,0 мм. Наиболее распространены стали толщиной 0,35 и 0,5 мм.

Листовую электротехническую сталь *маркируют* по следующему принципу:

- первая цифра (1, 2, 3) — структурное состояние и вид прокатки (1 — горячекатаная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная с ребровой текстурой);
- вторая цифра — содержание кремния (0 – с Si до 0,4; 1 — до 0,8; 2 — до 1,8; 3 — до 2,8; 4 — до 3,8; 5 — до 4,8 %).

- третья цифра — удельные потери в стали (*p*) или магнитная индукция (*B*) для рекомендуемых условий работы (0 — *p*, Вт/кг при В = 1,7 Тл и *f* = 50 Гц; 1 — *p*, Вт/кг при *B* = 1,5 Тл и *f* = 50 Гц; 2 — *p*, Вт/кг при *B* = 1,0 Тл и *f* = 400 Гц; 6 — В, Тл в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м; 7 — *B*, Тл в средних магнитных полях при 10 А/м;
- четвертая цифра — порядковый номер типа стали (тип определяется сочетанием трех первых цифр).

Малолегированные стали (с содержанием Si до 0,8 %) широко используются для производства якорей и полюсов машин постоянного тока. Среднелегированные (Si до 2,8 %) применяются при изготовлении магнитопроводов машин переменного тока. Высоколегированные (Si до 3,8 % и более) массово употребляют при изготовлении сердечников трансформаторов. Для этой же цели используются холоднокатаные текстурованные стали, которые резко сократили размеры и массу трансформаторов (приблизительно на 20–30 %). Однако при ремонте следует учитывать, что магнитные свойства этих сталей неодинаковы вдоль и поперек прокатки. Магнитная проницаемость вдоль прокатки намного больше. Следовательно, при шихтовке магнитопровода следует обеспечить на всем пути магнитного потока нужное направление прокатки.

*Магнитомягкие сплавы специализированного назначения* составляют особую группу. Применение их основано на наличии особенностей магнитных свойств, которые определяются составом и структурой. В основном они используются в радиотехнике, приборах и т.п. В ремонте электрооборудования особый интерес в них представляют немагнитные стали и чугуны. Эти материалы наиболее распространены при изготовлении бандажной проволоки, валов специальных машин, крепежа и т.п., где магнитные свойства обычных материалов нарушают нормальную работу электрического оборудования.

## 3.2. Магнитотвердые материалы

Отличаются они относительно малой магнитной проницаемостью, но большой коэрцитивной силой и энергией, отдаваемой в ок-

ружающую среду. Эти материалы применяют для изготовления постоянных магнитов.

Для магнитов неответственного оборудования наиболее пригодны обычные закаленные углеродистые стали. Их основной недостаток — слабая стабильность при механических воздействиях. Чтобы повысить ее, в сталь вводят легирующие добавки: хром, вольфрам, кобальт и др.

Для постоянных магнитов ответственных приборов и аппаратов используют специальные литые магнитотвердые сплавы типа альни, альнико, магнико, магниты из порошков (их различают по производству — магниты металлокерамические и металлопластические), а также магнитотвердые ферриты.

# Глава 4. Изоляционные материалы

Изоляция электрических изделий может выполняться из однородных диэлектриков или из их композиций.

Оцениваются диэлектрики по следующим основным характеристикам:

*электрическим* — диэлектрической проницаемости (ξ), удельным объемному и поверхностному сопротивлениям ($R_V$ и $R_S$), тангенсу угла диэлектрических потерь (tgδ), электрической прочности ($E_{пр}$); *тепловым* — нагревостойкости, теплопроводности, морозостойкости; *механическим* — прочностям на разрыв и сжатие, относительному удлинению; другим *физико-химическим показателям* — растворимости, химической стойкости, гигроскопичности, влагопроницаемости, дуго- и короностойкости.

В ремонтной практике чаще всего требуются *электрическая прочность и нагревостойкость.*

*Электрической прочностью* называется отношение пробивного напряжения к толщине диэлектрика в месте его разрушения (МВ/м или кВ/мм):

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h},$$

где $U_{\text{ПР}}$ — критическое напряжение, при котором диэлектрики, находясь в электрическом поле, теряют изоляционные свойства (разрушаются), МВ или кВ; $h$ — толщина диэлектрика (м или мм).

В электротехнике отличают электрический пробой диэлектрика от теплового. В первом случае его разрушение выполняется только электрическим полем, во втором – совместным воздействием электрического и теплового полей. Величина электрической прочности электрического пробоя всегда больше, чем теплового. Механизмы пробоя диэлектриков зависят от особенностей его строения и агрегатного состояния.

При этом в нормальных условиях электрическая прочность жидких диэлектриков выше, чем у газов. При снятии напряжения у жидких и газовых диэлектриков (после пробоя) изоляционные свойства восстанавливаются, у твердых — нет.

Особый вид пробоя — перекрытие изоляции, под которым понимается пробой диэлектрика с меньшей электрической прочностью по поверхности диэлектрика с большей электрической прочностью, если первый из них способен восстанавливать изоляционные свойства при снятии напряжения.

*Нагревостойкость* — способность изоляционных материалов выдерживать кратковременно или длительно действие высокой температуры без ухудшения свойств в течение всего срока службы. В соответствии с ГОСТом 8865–70 по наибольшим длительно допустимым рабочим температурам ($t$,°C) все диэлектрики, применяемые для изоляции электрических машин и аппаратов, разделяют на семь классов нагревостойкости, °С: $Y$ — 90; $A$ — 105; $E$ — 120; $B$ — 130; $F$ — 155; $H$ — 180; $C$ >180.

Это значит, что при данных температурах изоляция электрооборудования будет работать установленный целесообразный срок службы.

*Сроком службы изоляции* называется период, за который механическая прочность ее, постепенно падая, достигает 15–20 % на-

чального значения (при нажатии такая изоляция осыпается). Зависимость между температурой и сроком службы изоляции $\tau = f(t, °C)$ часто называют *«кривой жизни изоляции»*.

Исследованиями установлено, что для органических диэлектриков между тепловым старением и величиной температуры имеется следующая закономерность: увеличение или понижение температуры на одну и ту же величину ($\Delta t$) соответственно уменьшает или увеличивает срок службы изоляции в два раза.

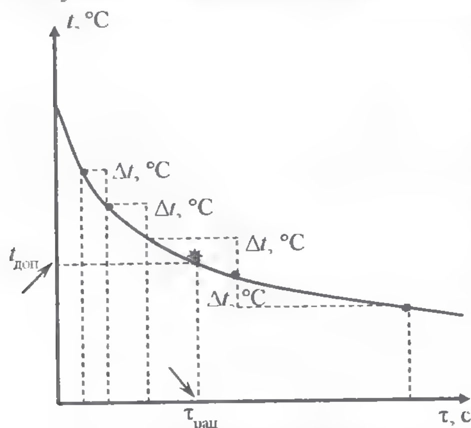


*Рис. 1.* Кривая жизни волокнистой органической изоляции

Например, $\tau = f(t, °C)$ для кабельной бумаги (рис. 1). По решению международной электротехнической комиссии (МЭК), $\Delta t$ принята равной 6°C.

Кривая рис. 1 с достаточной степенью точности описывается математическим выражением

$$\ln\tau = \frac{A}{T} + B,$$

где $A$ и $B$ — постоянные для данного материала (берутся в справочниках); $T$ — температура старения, К.

В соответствии с решением МЭК допустимо пользоваться в диапазоне температур 125–280°C также формулой

$$\tau = Ae^{-at},$$

где $A$ — постоянная для данного материала (берется в справочниках) численно равна сроку службы изоляции при 0°C; $t$ — температура старения (нагрева) изоляции, °C; $a$ — постоянная «скорости старения изоляции», при $a = 0{,}1145$ приводит к 6°C-градусному правилу: каждые 6°C повышения температуры изоляции сокращает срок ее службы в два раза, и, наоборот, понижение на 6°C увеличивает срок службы в два раза.

Приведенная на рис. 1 кривая $\tau = f(t,°C)$, а значит и нагревостойкость во многом определяют величину номинального тока ($I_Н$) электрических изделий. Действительно, если отложить по оси $\tau$, найденный технико-экономическим расчетом рациональный срок службы изоляции ($\tau_{рац}$), по кривой на оси $t$,°С можно определить допустимую рабочую температуру изделия ($t_{доп}$), а поскольку температура в основном зависит от величины потерь в обмотке ($\Delta P$), то исходя из известного выражения $\Delta P = I^2 \cdot R$ можно найти номинальный ток ($I_н$):

$$t_{доп} = к^* \cdot \Delta P = к^* \cdot I_Н^2 \cdot R,$$

где $к^*$ — коэффициент пропорциональности.

По агрегатному состоянию, т.е. состоянию, в котором диэлектрики находятся в работающих машинах и аппаратах, они делятся на *газообразные, жидкие и твердые.*

## 4.1. Газообразные диэлектрики

Газообразные диэлектрики делят на две группы: естественные и искусственные.

*Естественные газообразные диэлектрики.* Наибольшее применение из них в силу своей распространенности получил воздух, даже в тех случаях, когда его присутствие в изоляции нежелательно.

*Воздух* — смесь газов с электрической прочностью $E_{ПР} = 3{,}2$ кВ/мм (при 0,1 МПа и 20°С), плотностью — 1,293 кг/м³. $E_{ПР}$ воздуха зависит в основном от расстояния между электродами, давления, температуры и влажности. Приведенная величина соответствует +20°С, давлению 0,1 МПа и расстоянию между электродами 10 мм. Ток утечки через воздух крайне мал, поэтому $\mathrm{tg}\delta$ его практически равен нулю.

В воздушных линиях электропередачи, сухих трансформаторах, коммутационных аппаратах, распределительных устройствах и т.п. воздух является основной изоляцией. Во многих электрических объектах он играет роль дополнительной изоляции к твердым и жидким диэлектрикам.

*Азот* по электрическим характеристикам близок к воздуху, однако в отличие от него не содержит кислорода, который оказывает окисляющее воздействие на соприкасающиеся с ним материалы.

*Водород* — очень легкий газ с высокой теплопроводностью и удельной теплоемкостью, что делает его весьма полезным для использования в качестве охлаждающей среды вместо воздуха. Применение его в электрических машинах снижает потери электрической мощности на трение и вентиляцию, а отсутствие окисляющего фактора замедляет старение органической изоляции.

*Гелий* — инертный газ, используется в качестве низкотемпературного хладагента, например, для получения сверхпроводимости.

*Искусственные газообразные диэлектрики.* К ним относятся элегаз, хладоген 12 и др. Из них в ремонтной практике определенный интерес представляет элегаз. Он нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до 800°C, распространен в конденсаторах, кабелях и пр.

В электровакуумных лампах и приборах широко применяются инертные газы и пары ртути, в качестве охлаждающей среды — водород, для получения сверхпроводимости — жидкий гелий.

## 4.2. Жидкие диэлектрики

Жидкие диэлектрики, как и газообразные, делятся на *естественные* и *искусственные*. К *естественным* относятся нефтяные и растительные масла.

*Трансформаторное масло* применяется в трансформаторах, выключателях и других изделиях. Вырабатывается оно путем ступенчатой перегонки нефти. Сначала из нефти удаляются бензин, керосин, лигроин. Путем перегонки мазутов в трубчатых установках образуется соляровый дистиллят. Он и является исходным материалом при получении трансформаторного масла. Для этого в дистиллят вводится крепкая серная кислота, что дает возможность удалить из него все смолы и другие соединения. Затем продукт обрабатывается водным раствором щелочи для нейтрализации кислот. Далее проводится отстой и промывка водой с последующей

просушкой. И наконец, обработка мелкоразмолотой отбеливающей землей, что удаляет последние остатки смол и кислот. В результате получается чистое, сухое масло соломенно-желтого цвета со слабым запахом керосина.

Его основные характеристики следующие: в условиях эксплуатации $E_{ПР}$ = 15–20 МВ/м (при 20°С и 50 Гц), сразу после производства $E_{ПР}$ может быть равным 60–80 МВ/м; температура застывания –45°С; температура вспышки паров +135°С; кислотное число (количество г КОН на 1 кг масла) 0,015–0,02; вязкость $\sim 30 \cdot 10^{-6}$ м²/с (при 20°С); объемное удельное сопротивление $10^{12}$–$10^{13}$ Ом·м (при 0°С); $tg\delta$ = 0,001–0,003 (при 20°С).

К основным достоинствам трансформаторного масла относятся: высокая электрическая прочность и доступность, к недостаткам — гигроскопичность (жадно поглощает влагу из окружающей среды), низкая стабильность (подвержено ускоренному окислению), пожаро- и взрывоопасность. Последнее объясняется тем, что при высоких температурах масло разлагается с образованием до 70 % водорода и около 25 % метана. Оба газа с воздухом образуют взрывчатую смесь.

Трансформаторное масло в электрооборудовании, как правило, выполняет двойную задачу. Во-первых, повышает электрическую прочность изоляции (за счет вытеснения при заливке из ее пор воздуха), во-вторых, активно отводит тепло от источников тепловых потерь (обмоток и магнитопровода).

Широко применяются в электротехнике также конденсаторные и кабельные масла. Они получаются тоже из нефти и отличаются от трансформаторного масла только степенью очистки, вязкостью и другими характеристиками. Например, для увеличения вязкости к кабельному маслу дополнительно добавляется канифоль или синтетический загуститель. Масла с высокой степенью очистки, пониженной вязкостью и с повышенными электроизоляционными свойствами используют в конденсаторах и маслонаполненных кабелях особо высоких напряжений.

*Искусственные жидкие диэлектрики.* К ним относятся хлорированные углеводороды (совол, совтол), кремнийорганические, фтор-

органические и другие синтетические жидкости. Для практики наибольший интерес представляет кремнийорганическая жидкость.

*Кремнийорганическая жидкость* бесцветная, ее основные характеристики: $E_{пр}$ = 18–20 МВ/м (при 20°С и 50 Гц); температура застывания – 60°С; допустимая рабочая температура длительно +250°С и кратковременно +350°С; вязкость $10–20 \cdot 10^{-6}$ $м^2/с$ (при 20°С); удельное объемное сопротивление $10^{10}–10^{12}$ Ом·м ((при 20°С); tgδ = 0,0001–0,0003 (при +20°С и 1 кГц); обладает малой гигроскопичностью. Жидкость весьма дорогая, применяется, в частности, при производстве конденсаторов, работающих при особо повышенных или пониженных температурах.

*Фторорганические жидкости* — хорошие охладители, полностью негорючие (однако при 500°С и более способны выделять токсичные вещества), имеют низкую гигроскопичность, пониженную вязкость, высокую дугостойкость, но дорогие.

*Совол* — прозрачная бесцветная жидкость, электрическая прочность близка к трансформаторному маслу. Негорюч, но имеет повышенную вязкость, токсичен. Применяется в бумажных конденсаторах.

*Совтол* — жидкость из смеси 90 % совола и 10 % трихлорбензола. По характеристикам близок соволу, но обладает пониженной вязкостью, что позволяет использовать его в трансформаторах, однако в масляных выключателях его использовать нельзя, так как в дуге он дает большое количество сажи, токсичен.

## 4.3. Твердые диэлектрики

Такие материалы можно разделить по *происхождению* на природные (естественные) и искусственные, *по химическому составу* — на органические, под которыми подразумеваются вещества на основе соединений углерода (но в них также могут входить и другие элементы) и неорганические. Последние, как правило, обладают большей нагревостойкостью, чем органические. *По строению* диэлектрики делятся на волокнистые, кристаллические и аморфные. *По исходному состоянию* при производстве изоляции отдельную подгруппу составляют твердеющие материалы.

**Волокнистые электроизоляционные материалы в непропитанном состоянии.** К ним относятся органические и неорганические материалы, состоящие из частиц удлиненной формы (волокон). Их достоинства: достаточно большая механическая прочность, гибкость, как правило, хорошо обрабатываются, доступны и дешевы. Недостатки: малая электрическая прочность из-за воздуха в порах волокон, плохая теплопроводность, гигроскопичность.

*Волокнистые органические электроизоляционные материалы:* дерево, бумага, электрокартон, ткани, ленты и т.п.

- *Дерево* — природный, легко доступный материал. Класс нагревостойкости — *Y* (без пропитки) и *A* (после пропитки), электрическая прочность зависит от состояния древесины и породы, например, для бука в непропитанном состоянии $E_{\text{пр}}$ = 3–4 МВ/м, в пропитанном — 5–7 МВ/м. Материал делят по породам на твердые (дуб, бук, береза) и мягкие (сосна, ясень). Легко обрабатывается, но вместе с тем он особо гигроскопичный, склонен к короблению, растрескиванию, изменению линейных размеров (усушке), следовательно, механические характеристики, как и электрические, нестабильны. Область применения весьма широкая: опоры линий электропередач, пазовые клинья, прокладки в электрических машинах, трансформаторах и пр. В последнее время вытесняется более качественными диэлектриками (пластмасса, стекло).
- *Бумаги и картоны.* Класс нагревостойкости в непропитанном состоянии — *Y*. Эти материалы вырабатываются из целлюлозы, главным образом древесной. Для получения электротехнических бумаг и картонов — лигнин (вещество, придающее древесине хрупкость) удаляется из целлюлозы щелочными растворами, что придает им желтоватый цвет; но зато эти же растворы обеспечивают повышенную механическую прочность и нагревостойкость. Основные достоинства картонов и бумаг — экономичность и недефицитность; выпускаются в листах и рулонах.

Электротехнические бумаги по *применению* делят на:

- *кабельную*, в марках (например, К-120), буквами обозначаются: К — кабельная, М — многослойная, В — высоковольтная,

У — уплотненная; цифра показывает толщину бумаги в микронах (мкм). Без пропитки $E_{ПР}$ = 8–10 МВ/м (при 20°С и 50 Гц);

- *телефонную* (изготавливается разных цветов). Без пропитки $E_{ПР}$ = 10–12 МВ/м (при 20°С и 50 Гц);
- *конденсаторную*, она самая тонкая, повышенной механической прочности. Без пропитки $E_{ПР}$ = 12–15 МВ/м (при 20°С и 50 Гц);
- *пропиточную*, идет на изготовление листового гетинакса; разновидность — *намоточная бумага*, которая используется при изготовлении цилиндрических слоистых пластиков; она обладает повышенной пористостью и пониженной плотностью;
- *микалентную*, используется в качестве подложки при производстве микафолия и микалент; механическая прочность их мала;
- *хлопковую*, применяется при изготовлении лакобумаг, имеет хорошие механические характеристики;
- $E_{ПР}$ — трех последних бумаг, зависит от пропиточных материалов.

*Электрокартоны* отличаются от бумаг в основном только толщиной. В электротехнике они используются для работы на воздухе, в этом случае их подвергают специальному уплотнению, поэтому механически более прочны, имеют глянцевую поверхность; а также для работы в масле, тогда они более мягки и рыхлы, обладают повышенной впитываемостью. Первые применяются для прокладок электрических машин, изготовления каркасов катушек и т.п., без пропитки $E_{ПР}$ = 8–13 МВ/м (при 20°С и 50 Гц), вторые — для изоляционных деталей масляных трансформаторов. Эти картоны в зависимости от аппаратов, для которых предназначены, дополнительно подразделяются на четыре вида (А, Б, В, Г). $E_{ПР}$ = 40–85 МВ/м в пропитанном состоянии (при 20°С и 50 Гц).

- *Ткани и ленты* на основе хлопчатобумажной и натуральной шелковой пряжи. Из последней делается значительно более тонкая изоляция, однако она намного дороже и в последнее время почти полностью вытеснена искусственными волокнами типа вискозного и ацетатного шелка, а также синтетическими волокнами: лавсан, терилен, дакрон, капрон, нейлон и др. Электрическая прочность этих изоляций определяется $E_{ПР}$ воздуха и приблизительно равна 3–5 МВ/м.

*Неорганические волокнистые электроизоляционные материалы:* асбест, стекловолокно, плавленый кварц, материалы на их основе и т.п.

- *Асбест* — естественный минеральный материал волокнистого строения. Класс нагревостойкости *C*, только при температуре более +300–400°С теряет молекулярную воду и, как следствие, механическую прочность. К недостаткам асбеста относится повышенная толщина волокон. Из него изготовляется бумага, ткани, шнуры, ленты и пр. Изоляционные свойства асбеста значительно улучшаются пропиткой его изоляционными лаками.

- *Стеклянное волокно* получается путем пропускания расплавленной стеклянной массы через тонкие отверстия (фильеры). Оно обладает повышенной гибкостью, при диаметре 3–7 мкм волокна можно обрабатывать приемами текстильной технологии. Имеет повышенную механическую прочность и нагревостойкость (класс *C*), его рабочая температура в зависимости от состава колеблется от +450 до +1000°С. Недостаток — низкая устойчивость к истиранию, хрупкость.

Волокно и нити из стекла широко используются для производства лент, тканей, изоляции проводов, шнуров и т.п.

Стеклоткань применяется и как исходный материал для изготовления многих видов изоляционных изделий: лакотканей, текстолита и др.

Стеклянная лента (ЛСП) вытесняет кабельную бумагу при изоляции кабелей.

Электроизоляционный шнур (ШЭС) используется для бандажировки лобовых частей обмоток электрических машин и пр.

Электрическая прочность ($E_{ПР}$) этих материалов определяется наличием воздуха в порах и составляет 3–5 МВ/м (при 20°С, 50 Гц).

**Волокнистые электроизоляционные материалы в пропитанном состоянии.** Они представляют собой органические и неорганические волокнистые материалы, пропитанные электроизоляционными лаками, вследствие чего, по сравнению с непропитанными, имеют повышенную электрическую и механическую прочность, теплопроводность и нагревостойкость, пониженную гигроскопичность.

К ним относятся лакоткани, изоляционные ленты, лакобумаги, лакированные трубки и т.п.

- *Лакоткани.* Повышение их механической прочности обеспечивается тканью, а электрической — лаковой пленкой.

*По основе* лакоткани подразделяют на хлопчатобумажные, шелковые, стеклянные, капроновые и пр.; *по пропитывающим лакам* — на светлые (желтые), пропитанные в основном масляными лаками, и черные — пропитанные в основном масляно-битумными лаками. Кроме указанных, пропитка тканей проводится и другими лаками.

Основа и пропиточный лак указываются в марках лакотканей: ЛХМС (Л — лакоткань, Х — хлопчатобумажная, М — пропитка масляными лаками, С — светлая). Для большинства лакотканей после марки указывается ее нагревостойкость: ЛШМ-105 — класс нагревостойкости *А* (105°С).

Светлые хлопчатобумажные лакоткани имеют электрическую прочность 35–40 МВ/м, шелковые — 55–90 МВ/м, черные хлопчатобумажные — 50–60 МВ/м. К тому же последние значительно менее гигроскопичны и склонны к тепловому старению, но и менее устойчивы к органическим растворителям.

Массовое применение для изоляции электрических машин, аппаратов, кабельных и других изделий получили следующие лакоткани:

- *хлопчатобумажные*, марок ЛХМ, ЛХМС, обладают относительно повышенной стойкостью к действию органических растворителей, но, как и все хлопчатобумажные ткани, имеют относительно высокую толщину;
- *шелковые* — МШМ, ЛШМС, значительно тоньше по сравнению с хлопчатобумажными, что позволяет уменьшить габариты изделия, обладают высокими электрическими характеристиками, но значительно дороже;
- *капроновые* — ЛКМ, ЛКМС — лакоткани повышенной гибкости, но с более значительной усадкой при нагреве;
- *стеклолакоткани* марок ЛСМ, ЛСБ (С — на основе стеклоткани, Б — пропитаны битумно-масляно-алкидными лаками) обладают характеристиками, соответствующими материалам пропитки. Ткани марок ЛСП, ЛСК (пропитанные, соответственно, полиэфирно-эпок-

сидными и кремнийорганическими лаками). Первые имеют повышенную электрическую прочность, устойчивы к органическим растворителям, класс нагревостойкости *F*. Вторые — устойчивы к влажной среде, обладают стабильными электрическими характеристиками при изменении температуры, класс *H*, но лаковая пленка неустойчива к органическим растворителям. Стеклолакоткани марок ЛСЛ, ЛСЭ, ЛСКР — резиностеклолакоткани (соответственно латексная, эскапоновая, кремнийорганическая, резиновая) имеют повышенную эластичность, но латексная и эскапоновая лакоткани обладают склонностью к ускоренному старению и имеют пониженную водостойкость, класс нагревостойкости *E*. Класс нагревостойкости стеклолакотканей зависит от пропитывающего состава и колеблется от *A* до *H*.

Особую группу составляют липкие и самосклеивающиеся стеклолакоткани и резиностеклолакоткани (ЛСЭПЛ, ЛСКЛ, ЛСТР и др.). Они с одной или с двух сторон покрыты липким слоем, способным к самосклеиванию. Эти материалы в электрооборудовании нередко используются вместо слюдяных изделий (микалент).

*Лакированные трубки* отличаются от лакотканей тем, что представляют собой шнур-чулки, пропитанные и покрытые в несколько слоев изоляционными лаками. Их характеристики и области применения зависят от основы (хлопчатобумажные, шелковые, лавсановые, стеклянные и др.) и пропиточного материала. Классы нагревостойкости от *A* до *H,* электрическая прочность в среднем равна 35–90 МВ/м. Применяются для изоляции в обмотках электрических машин, трансформаторов и пр.

*Лакобумага* получается пропиткой бумаг (обычно длинноволокнистых) изоляционными лаками (чаще всего масляными). Материалы используются как заменители лакотканей, где это возможно, так как значительно дешевле и обладают достаточно близкими к ним электроизоляционными свойствами, но они менее механически прочные, класс нагревостойкости *A*. Лакобумаги, как и лакоткани, в последнее время вытесняются гибкими пленками.

*Липкие ленты* применяются при различного рода ремонтных работах. Промышленностью они выпускаются в виде кругов соответствующей ширины и диаметра. К ним относятся:

- *монтерская прорезиненная лента*, которая получается пропиткой хлопчатобумажной основы специальными составами, включающими эластомеры. $E_{ПР}$ около 15–20 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость менее класса *Y*, рабочая температура не выше +60–65°С; широко применяются для изоляции проводок в местах соединений;
- *липкая изоляционная стеклолента* — лента на основе стеклоткани, пропитанная нагревостойким кремнийорганическим лаком. $E_{ПР}$ = 20–30 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость до класса *F*, отличается повышенной эластичностью; используется чаще всего для изоляции лобовых частей обмоток электрических машин, работающих в режимах повышенных температур;
- *липкие ленты на основе гибких пленок*, покрытые липким специальным составом. Электрическая их прочность и классы нагревостойкости зависят от основы и покрытия, обладают повышенной эластичностью. Области применения весьма широкие: от изоляции мест сращивания проводов внутренних электрических сетей до изоляции обмоток электрических машин и аппаратов.

**Пластические массы** — это материалы, способные в пресс-формах под действием внешнего давления принимать требуемый вид. Большая часть изоляционных пластмасс (например, с органическими связующими) требуют также повышенной температуры. К достоинствам их, в первую очередь, относится высокая экономичность.

Пластмассы, используемые в электротехнике, — это чаще всего изоляционные материалы, состоящие из двух основных составляющих: *связующего* и *наполнителя*. К первым относятся смолы, битумы, цемент и др. Ко вторым — порошкообразные материалы (древесная или каменная мука), волокнистые (хлопчатобумажное, асбестовое или стеклянное волокно и пр.), а также листовые изделия (бумага, текстиль и т.п.).

Наполнитель в основном улучшает механические характеристики изоляции, но снижает электрические, к тому же повышает гигроскопичность. Вот почему для пластмасс, от которых требуются высокие электроизоляционные свойства, нередко от наполнителей отказываются, хотя они значительно их удешевляют. В пласт-

массы вводятся еще пластификаторы (для повышения гибкости) и красители (для получения нужного внешнего вида).

Электрические и механические характеристики, а также нагревостойкость пластмасс зависят от связующего и от наполнителя. $E_{ПР}$ в среднем составляет 3,0–40 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость колеблется от *A* до *H*.

Промышленностью пластмассовые изделия выпускаются в виде заготовок и готовых фасонных деталей часто сложной конфигурации.

Область применения пластмасс очень большая: от корпусов бытовых электроприборов до изоляционных деталей сложной конфигурации для электрических машин и аппаратов.

**Слоистые пластики.** Они отличаются от пластмасс только наполнителем, в качестве которых используются листовые волокнистые материалы. Слоистые пластики образуются путем пропитки наполнителя (нужного количества слоев для получения требуемой толщины материала) бакелитовой смолой с горячей прессовкой. При этом, если основой служит бумага, получается *гетинакс*, если ткани (хлопчатобумажная, шелковая и др.) — *текстолит*. Последний во много раз дороже гетинакса (5–6 раз), поэтому делается комбинация наполнителя: внутренние слои выполняются из бумаги, а наружные — с двух сторон из хлопчатобумажной ткани, такой материал называется *текстогетинакс*. Изготавливаются и другие виды слоистых пластиков: *древеснослоистые* (ДСП) – типа фанеры на бакелитовой смоле, *асботекстолит, стеклотекстолит и др.*

Все слоистые пластики анизотропны: электрическая прочность их при приложении напряжения перпендикулярно к слоям в 5–8 раз выше, чем вдоль слоев. Текстолиты, как правило, имеют значительно лучшие механические характеристики, чем гетинаксы. Например, лучше работают на истирание. Все слоистые пластики хорошо обрабатываются режущими инструментами (фрезой, резцом и пр.). Однако места обработок резко повышают гигроскопичность и снижают влагостойкость материала, поэтому не следует (если нет необходимости) снимать с них поверхностный слой, наоборот, целесообразно место обработки покрыть лаком.

Серьезный недостаток этих пластиков — плохая дугостойкость — при проскакивании искры на их поверхности остается науглероженный след, проводящий электрический ток.

Основные характеристики некоторых пластиков:

- *гетинакс* — $E_{ПР}$ в направлении, перпендикулярном слоям, равна 20–40 МВ/м (при 20°С) и 12–35 МВ/м (при 90°С), нагревостойкость класса *А*;
- *текстолит* (на основе хлопчатобумажной и шелковой ткани) $E_{ПР}$ в направлении, перпендикулярном слоям, равна 5–10 МВ/м (при 90°С), нагревостойкость класса *А*;
- *стеклотекстолит* — $E_{ПР}$ в направлении, перпендикулярном слоям, равна 6–27 МВ/м (при 90°С), нагревостойкость класса *В*;
- *асботекстолит* — $E_{ПР}$ в направлении, перпендикулярном слоям, равна 1,0–1,5 МВ/м (при 90°С), нагревостойкость класса *С*;
- *древеснослоистый пластик* (ДСП) — $E_{ПР}$ в направлении, перпендикулярном слоям, равна 3–4 МВ/м (при 90°С), нагревостойкость класса *А*.

Промышленностью слоистые пластики выпускаются в виде досок, а также фасонных изделий: намотанные бакелитовые (гетинаксовые) трубки, цилиндры. Свойства намотанных изделий уступают листовым.

К числу слоистых электроизоляционных материалов следует отнести и фибру.

*Фибра* — бумага, пропитанная хлористым цинком, сложенная в несколько слоев и спрессованная. Электрическая прочность невысока, $E_{ПР}$ — 1,0–3,5 МВ/м (при 20°С и 50 Гц), механическая прочность достаточно большая, очень гигроскопична, при этом теряет форму и диэлектрические свойства. Выпускается в виде досок и фасонных изделий, применяется для прокладок, панелей, в трубчатых разрядниках и пр.

**Гибкие пленки** — это особый вид пластмасс, изготавливаемых из органических полимеров. Характерны малой толщиной (могут быть даже менее 0,02 мм) и большой гибкостью при высокой электрической и механической прочности. Они обладают малой гигроскопичностью, а также хорошими изоляционными свойствами. $E_{ПР}$

составляет 60–300 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость 90–240°С (классы — от *Y* до *C*). Полиэтилентерефталатные пленки дополнительно имеют повышенную химическую стойкость. Недостаток всех гибких пленок — высокая чувствительность к надрывам.

Выпускаются в виде рулонов, применяются в изоляции электрических машин, обмоточных проводов, кабелей и т.п., а также в качестве диэлектриков конденсаторов.

**Комбинированные электроизоляционные материалы.** Их можно рассматривать как особого рода слоистые материалы из гибких пленок или пластмасс, оклеенных или спрессованных с волокнистыми материалами, в пропитанном или непропитанном состоянии, что дает возможность объединить их достоинства и устранить многие недостатки.

Электрическая прочность таких материалов зависит от вида и колеблется в широких пределах (5 МВ/м (при 20°С) для электронита панельного и 100–130 МВ/м (при 20°С) для пластика электроизоляционного с полиэтилентерефталатной пленкой). То же и нагревостойкость их — от *Y* до *H*, а рулонный электроизоляционный материал (РЭМ) имеет рабочую температуру только 15–35°С.

Выпускается в виде рулонов, досок и других изделий для изоляции электрических машин, аппаратов и прочих устройств.

**Эластомеры.** К ним относятся материалы на основе каучука и близких к нему веществ. Главное их достоинство — высокая эластичность, кроме того, они практически непроницаемы для влаги и газов, как правило, обладают хорошими изоляционными качествами.

*Резина мягкая* получается путем вулканизации каучука (нагрева его с добавкой 3–10% серы), нередко в них добавляются наполнители, красители и другие вещества. Однако такая резина содержит остатки свободной серы, которая вредно воздействует на медь и другие материалы. Поэтому для изоляции меди используют *тиурамовую резину*, она представляет собой каучук, вулканизированный не чистой серой, а тиурамом (соединением серы).

Резины — материалы термореактивные (т.е. при нагревании не размягчаются), обладают высокой растяжимостью, упругостью.

$E_{ПР}$ = 20–30 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость 55°С (для тиурамовой резины 65°С, при зашите ее оболочками даже до 80°С).

Резины с сажевым наполнителем (черного цвета) имеют повышенные механические характеристики, но пониженные электрические. Общие недостатки резин: относительно малая рабочая температура, при $t$ > 60–80°С идет ускоренное ее старение, она становится хрупкой, растрескивается; малая стойкость к органическим растворителям и маслам, к свету и озону.

Применяется для изготовления различных изоляционных изделий (перчаток, ковриков, калош и пр.), а также изоляции монтажных, установочных проводов, гибких кабелей.

*Эбонит* получается, как и резина, но при содержании серы 30–35 %. Материал твердый с высокой устойчивостью к ударным нагрузкам, хорошо обрабатывается. $E_{ПР}$ = 15 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость — до +50°С.

Выпускается в листах, палках и трубках, применяется в основном в качестве изоляционных изделий.

**Неорганические электроизоляционные материалы.** К ним, в частности, относятся слюда (и изделия из нее), стекло, керамические диэлектрики и др.

***Слюда*** – природный минерал слоистого строения с повышенной электрической и механической прочностью, нагревостойкостью, влагостойкостью, достаточной гибкостью. По химическому составу ее подразделяют на *мусковит* и *флогопит*. Мусковит — бесцветные пластинки с лучшими изоляционными показателями, чем флогопит, механически более твердый, гибкий и упругий, лучше работает на истирание. Флогопит — пластинки более темные (от янтарных до почти черных), по сравнению с мусковитом более нагревостойкий. Если мусковит ухудшает изоляционные свойства при температуре 200–600°С, то флогопит — при 800–900°С.

Применяются в виде листочков щипаной слюды там, где изоляция работает при особо повышенных температурах: нагревательные электрические изделия (паяльники, плитки, печи и т.п.).

***Миканиты*** – материалы из отдельных пластинок слюды, склеенных лаками или смолами, иногда с использованием бума-

ги или ткани, которые подклеиваются к слоям слюды с одной или двух сторон. Такая подложка увеличивает механическую прочность материала при изгибах. Выпускаются в виде листов и рулонов.

По назначению они делятся на коллекторные (в марках обозначается буквой К), прокладочные (П), формовочные (Ф), гибкие (Г), микафолий (М), микаленты (Л). Отличаются в основном клеящим веществом и технологией изготовления. Вторая буква марки показывает вид слюды: М — мусковит, Ф — флогопит, С — их смесь. Третья буква или цифра показывает дополнительные характеристики материала. Основные изоляционные характеристики: $E_{ПР}$ (МВ/м при 20°С) и нагревостойкость — *С, Н, В*:

*коллекторный* — 15–18, *С*;
*прокладочный* — 16–20, *С*;
*формовочный* — 14–18, *Н*;
*гибкий* — 16–28, *В, Н*;
*микафолий* — 14–18, *Н*;
*микалента* — 9–20, *В*.

***Слюдиниты, слюдопласты (слюдяные бумаги)*** — материалы на основе слюды, чаще отходов (щипки слюды) со специальной технологией изготовления. На их основе выпускается много различных изоляционных изделий, например, стеклослюденитовые непропитанные ленты. $E_{ПР}$ — 10–20 МВ/м (при +20°С), нагревостойкость — *В*, с повышенной гибкостью при комнатной температуре.

***Микалекс*** — материал твердый с увеличенным содержанием слюды, в качестве связующего применяется легкоплавкое стекло. Из данного материала прессованием получают фасонные изоляционные изделия, отличающиеся высокой нагревостойкостью, дугостойкостью, большой механической прочностью, материал можно обрабатывать и шлифовать. Однако следует иметь в виду, что он дорогой. $E_{ПР}$ — 10–20 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость — *С*.

Область применения миканитов и других слюдяных изделий обширна: прокладки, шайбы, детали изоляций электрических машин, аппаратов и многое другое. Но при выборе их следует учитывать, что экономичны детали из слюды только там, где требуется

повышенная нагревостойкость, поскольку они значительно дороже, чем из других материалов (волокнистых и пр.).

***Фарфор*** относится к керамическим диэлектрикам. Он содержит специальные глины, кварц, полевой шпат и воду. Изделия из него получаются после сушки готовых фасонных деталей, глазуровки и обжига. Глазурь – специальная масса, которая наносится на поверхность фарфора, при обжиге она расплавляется и покрывает его тонким, гладким, блестящим слоем, это необходимо для защиты фарфора от проникновения в него влаги, так как он пористый. Материал влаго-водо-химо-дугостойкий, механически твердый, $E_{ПР}$ — 10–30 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость — класс *С*. Применяется в основном для изготовления различного вида электрических изоляторов.

***Стекло*** — прозрачный, аморфный, неорганический материал, получаемый переплавкой различных исходных материалов и представляющий собой сложные системы различных окислов. Свойства стекол зависят от их состава и термической обработки, они колеблются в широких пределах. В среднем $E_{ПР}$ — 25–50 МВ/м (при 2О°С), нагревостойкость — *С*, температура размягчения для большинства составов стекол — 400–1600°С. Наиболее применимы в электротехнике прозрачные и непрозрачные кварцевые стекла. Они механически прочны, особенно хорошо работают на сжатие, но хрупкие, химически влаго-водо-короно-дугостойкие.

Применяется, как и фарфор, для изготовления различного вида электрических изоляторов, а также для получения стекловолокна и других изделий.

## 4.4. Твердеющие электроизоляционные материалы

Это материалы, которые в исходном виде (для изготовления изоляции) находятся в жидком состоянии, однако в электротехнических изделиях они используются как твердые вещества (чаще всего в виде эластичной прочной пленки с высокими изоляционными показателями). К ним относятся высыхающие масла, смолы, битумы, лаки, эмали, компаунды и т.п.

***Смолы*** — сложные смеси органических веществ, главным образом высокомолекулярных, аморфного строения.

По *происхождению* они делятся на природные и искусственные, по отношению к *нагреву* — на термопластичные и термореактивные. Термопластичные при нагревании переходят в жидкое состояние, при охлаждении вновь твердеют практически без изменения свойств. Термореактивные при нагревании и соответствующей температуре переходят в твердое состояние, теряют способность к плавлению и растворению.

$E_{ПР}$ колеблется от 10 до 80 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость в основном класса *A*, *E*. В ремонтной практике массово применяются следующие смолы:

- *канифоль* — природная смола из живицы хвойных деревьев, легко растворяется в растительных и нефтяных маслах, спирте, скипидаре; термопластична (температура начала размягчения — 50–70°С, жидкое состояние при 100–110°С); материал доступный и дешевый. В электротехнике применяется в качестве флюса, добавок при изготовлении лаков, компаундов и пр.;
- *шеллак* — природная смола, продукт жизнедеятельности насекомых тропических стран, легко растворяется в спирте, материал термореактивный, но дает хорошую изоляционную пленку и при холодной сушке, дорогой. Применяется лишь в виде лака в ответственных случаях, чаще всего в эксплуатации;
- *бакелит* — искусственная фенолформальдегидная смола. Он термореактивен. Имеет достаточно хорошие электроизоляционные свойства и высокие механические характеристики. Обладает хорошей клейкостью и растворимостью в спирте, а также в других растворителях, мало эластичен, недугостоек, не отличается высокой стойкостью к воде.

Широко используется для пропитки дерева, изготовления пластмасс, в том числе слоистых пластиков и производства других материалов, изделий;

- *глифталь* — синтетическая смола, термореактивна, более эластична и клейка, чем бакелит, и более дугостойкая, устойчива к тепловому старению, хорошо растворяется в ацетоне, спиртобензольной смеси и иных растворителях. Применяется в основном в электроизоляционных лаках;

• *кремнийорганические смолы* — искусственные смолы, в состав которых входит кремний. Имеют повышенную нагревостойкость по сравнению со всеми органическими смолами. Они обладают высокими электроизоляционными свойствами (даже при повышенных температурах). Отличаются малой гигроскопичностью, практически не смачиваются водой, покрытие ими различных изделий создает эффект водоотталкивания. Механическая прочность пленок таких смол невелика. Химическая стойкость их неудовлетворительна, дорогие. Однако широко используются для изготовления лаков, в компаундах, пластмассах и пр.

**Битумы** — тоже сложные смеси углеводородов аморфного строения, естественного и искусственного происхождения, черного цвета. При низких температурах они хрупки, при повышении температуры плавятся, так как эти материалы термопластичные. Температура размягчения битумов +130 +140°С. Битумы хорошо растворяются в углеводородах (бензол, толуол и др.), но не в воде и спирте, немаслостойкие. Гигроскопичность плохая, при достаточной толщине практически водонепроницаемы. $E_{пр}$ — 10–25 МВ/м (20°С). Применяются в компаундах, лаках, различных электроизоляционных изделиях.

**Высыхающие масла** — вязкие жидкости, способные переходить в твердое состояние с хорошими изоляционными свойствами. Получаются в основном из семян растений (льна, тунгового дерева, клещевины). Образующиеся пленки, как правило, термореактивные. Скорость высыхания масел ускоряется под действием температуры, воздуха, освещения, а также других факторов. Ускоряется высыхание и при использовании *сиккативов*, под которыми понимаются соединения некоторых металлов (свинца, кобальта, марганца), они вводятся в масла в качестве катализаторов химических реакций высыхания. Однако повышенное содержание сиккативов ускоряет тепловое старение материалов. Пленки высыхающих масел достаточно маслостойки даже при повышенной температуре (что очень важно, например, в трансформаторах). Применяются при изготовлении лаков, лакотканей, для пропитки дерева, бумаг, некоторых изоляционных изделий и т.п.

*Лаки* — это коллоидные растворы пленкообразующих веществ в растворителях. В качестве основы главным образом используются смолы естественного и искусственного происхождения, битумы, высыхающие масла. В качестве растворителей применяются спирт, уайт-спирит, толуол, ксилол, скипидар, вода и пр.

При сушке растворитель удаляется, основа переходит в твердое состояние. $E_{пр}$, в зависимости от основы, — 30–75 МВ/м (при 20°С), нагревостойкость, в зависимости от состава лака, от *А* до *Н*.

*По применению лаки разделяют на*:

- *пропиточные* служат для замещения в пустотах изоляции воздуха лаком, что улучшает все ее изоляционные характеристики. К пропиточным лакам относится также большинство эмалей. Эмали — это лаки с добавкой пигментирующих веществ. Пигменты (в основном окислы металлов) вводят для придания лаковой пленке определенной окраски, улучшения ее механической прочности и приставаемости к поверхности, на которую наносится эмаль;
- *покровные* — для образования на поверхности электроизделий механически и электрически прочной, влагостойкой, гладкой пленки.
- *клящие* применяются для склеивания или изготовления различных твердых электроизоляционных материалов (изоляционных цилиндров, трубок, миканитов и т.п.), а также приклеивания их к металлам.

По *режиму сушки* их делят на лаки *горячей* и *холодной* сушки; первые дают пленку с высокими изоляционными свойствами только при нагревании до температуры выше +70°С, вторые — при сушке в условиях комнатной температуры.

Как правило, лаки горячей сушки дают более качественную во всех отношениях пленку.

По *основе* лаки делят на: смоляные, целлюлозные, масляные, битумные, масляно-смоляные и масляно-битумные.

*Смоляные лаки* — основой их являются смолы, к ним относятся следующие разновидности:

- *бакелитовые* — раствор бакелита в спирте. По применению лаки делятся на пропиточные, покровные и клеящие. Термореактивные, холодной и горячей сушки. Пленки их механически прочные, но мало эластичные, склонные к ускоренному тепловому ста-

рению. Используются для изоляции электрических машин и аппаратов в основном высокого напряжения, используются при производстве текстолита, гетинакса и других изоляционных изделий;

- *глифталевые* — раствор глифталевой смолы в смесях спирта с жидкими углеводородами или в им подобных растворителях. Лаки пропиточные, клеящие. Они термореактивные, горячей сушки. Гибкость пленок таких лаков выше, чем бакелитовых, влагостойкость ниже. Применяются в основном в изоляции трансформаторов;
- *кремнийорганические* — эти лаки пропиточные и клеящие, горячей сушки, термореактивные. Они дают пленку с повышенными электроизоляционными характеристиками. Используются там, где изоляция работает при повышенной температуре, в атмосфере повышенной влажности и т.п.;
- *поливинилхлоридные* — лаки покровные, термореактивные, горячей сушки. Их пленки обладают повышенной химической стойкостью. Применяются там, где на изоляцию действуют пары бензина, масел, кислот.

***Целлюлозные лаки*** — растворы эфиров целлюлозы. Из них наиболее массово применяются нитролаки. Все они покровные, в отдельных случаях пропиточные (например, для хлопчатобумажной оплетки автомобильных проводов). Чаще всего это лаки холодной сушки, термопластичные. Пленки (особенно нитролаков) блестящие, с высокой механической прочностью, влаго-химостойкие, устойчивы к воздействию кислорода воздуха, света, масел. Вместе с тем нитролаки плохо держатся на металлах, что требует грунтовки последних до наложения лака. Нередко они используются для защиты пленок пропиточных лаков с ускоренным старением. В этих случаях наложение нитролаков производится поверх таких пленок после их запекания.

***Масляные лаки.*** Их основой являются высыхающие масла, в состав могут входить также сиккативы и растворители (бензин, керосин). Лаки главным образом пропиточные и покровные. Они термореактивные, горячей сушки, однако, при высоком содержании сиккативов могут быть и холодной сушки. Пленки высоко эластич-

ные, маслостойкие. Применяются для изготовления лакотканей, лакобумаг, изоляции листов электротехнической стали.

***Битумные лаки*** — растворы битумов в органических растворителях; термопластичны, холодной сушки. Пленки имеют низкие электроизоляционные характеристики и малую гибкость, нагревостойкость невысокая. Используются для антикоррозийных покрытий.

***Масляно-смоляные лаки*** — составы их, кроме высыхающих масел, содержат естественные или искусственные смолы. Они могут быть пропиточными, покровными и клеящими. Термореактивные, горячей сушки. Характеристики изоляционных пленок зависят от состава лака. Например, масляно-глифталевые, по сравнению с чисто масляными лаками, имеют повышенную эластичность, клеящую способность, более нагревостойкие, а по сравнению с чисто глифталевыми лаками — с пониженной гигроскопичностью. Применяются в изоляции трансформаторов, обмотках электрооборудования, работающего в атмосфере с химически активными реагентами.

***Масляно-битумные лаки*** — в их основу, кроме высыхающих масел, входит битум, растворители бензол, толуол и др. По назначению они пропиточные и покровные. Горячей сушки, термопластичны, при нагревании пленки размягчаются, неустойчивы к маслам и другим органическим растворителям, но вместе с тем они влаго-химостойкие, менее гигроскопичные, слабо подвержены старению.

Нами рассмотрены лишь лаки, наиболее массово применяемые в ремонтной практике. Все лаки в соответствии со стандартизацией имеют буквенно-цифровое обозначение, при этом буквами указывается состав основы лака (БТ — масляно-битумный, ГФ — масляно-глифталевый и т.д.). В шифре первые цифры показывают назначение лака (9 — электроизоляционный), последующие — конкретный его вид.

☞ ***Компаунды*** отличаются от лаков тем, что в них отсутствует растворитель, и они могут быть в исходном состоянии твердыми. Однако для изготовления изоляции компаунды (нагреванием до соответствующей температуры) переводят в жидкое состояние с требуемой вязкостью. В их состав входят смолы, битумы, масла, воск.

Обычно компаунды термопластичны, однако все чаще используются термореактивные, особенно там, где от изоляции требуется повышенная нагревостойкость и способность не размягчаться при повышении температуры: в сухих трансформаторах, водостойких электрических машинах и т.п. По использованию делятся на пропиточные и заливочные.

Применение первых аналогично лакам. Например, их используют для пропитки статорных обмоток электрических машин, что дает возможность значительно улучшить электрическую прочность, нагревостойкость, стойкость к растворителям, влагостойкость и другие изоляционные показатели.

Вторые применяют для удаления воздуха из достаточно больших объемов и заполнения их массой с повышенными изоляционными характеристиками: кабельные воронки, муфты. В последнее время стали использоваться также пропиточно-заливочные компаунды для блоков электроаппаратов, для литой изоляции.

# Глава 5. Материалы специального назначения

***Конструкционные материалы***. К ним относятся такие, из которых изготавливаются корпуса, валы, беличьи клетки роторов, а также другие детали и узлы электрических машин и аппаратов: сплавы меди, алюминия, чугуны, стали. Последние по магнитным свойствам делятся на материалы магнитные и немагнитные. К первым относятся серый чугун, углеродистые и легированные стали, ко вторым — немагнитные стали и немагнитные чугуны.

*Серый чугун* используется для производства валов, крепежных и других деталей машин.

*Немагнитный чугун* применяется для кожухов сварочных трансформатов, втулок масляных выключателей, обойм силовых трансформаторов.

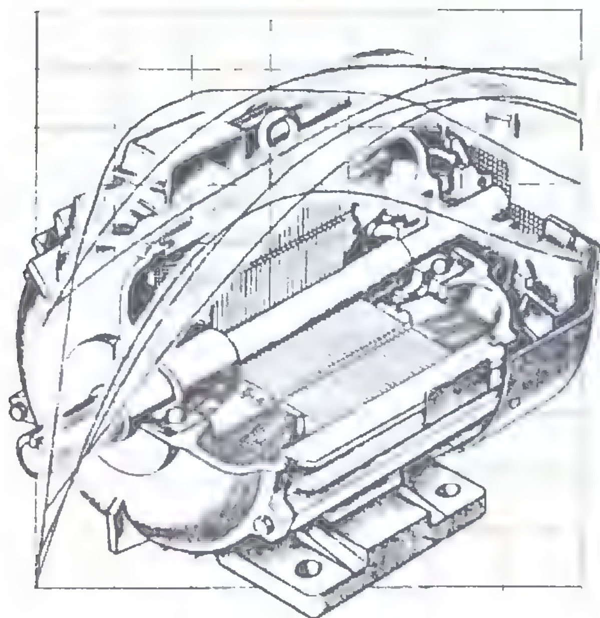
*Немагнитная сталь* используется для изготовления деталей, которые ранее выполнялись из дорогих сплавов меди и алюминия, которые к тому же не обладают такой механической прочностью, как сталь.

***Электроугольные изделия.*** Из них наибольший интерес в ремонтной практике представляют щетки. Это неподвижная часть скользящего контакта для подвода и отвода тока на контактных кольцах и коллекторах электрических машин. По составу и технологии изготовления они делятся на графитовые, угольно-графитовые, электрографитированные, бронзографитовые и медно-графитовые.

Все щетки характеризуются удельным электрическим сопротивлением, допустимой плотностью тока, твердостью, коэффициентом трения, допустимой окружной скоростью контактного кольца или коллектора, переходным падением напряжения на пару щеток, износостойкостью, давлением при работе на щетку.

*Медно- и бронзографитовые щетки,* широко используемые в эксплуатации, имеют особо малое электрическое сопротивление, а следовательно, малое контактное падение напряжения, вместе с тем они обладают большей твердостью, чем графитовые, что вызывает повышенную выработку контактных колец и коллекторов.

Электроугольные изделия применяются также в виде электродов для сварки, в электрических печах, непроволочных сопротивлениях и пр.



## Раздел второй

# ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

# Глава 6.
# Схема технологического процесса ремонта

Схема технологического процесса капитального ремонта электрических машин показана на рис. 2. Она определяет последовательность операций и увязывает их между собой.

Для мелких ремонтных мастерских, например, на одного работника схема технологического процесса, естественно, будет выглядеть иначе. В ней все ремонтные работы от 1 до 9 будут выполняться последовательно. Если мастерская не располагает соответствующим оборудованием, некоторые ремонтные работы могут вообще отсутствовать, например, восстановление обмоточного провода или слесарно-механические работы. Это относится и к отдельным ремонтным операциям, например, к сварке, если нет сварочной установки и пр.

Длительность, качество и себестоимость капитального ремонта электрических машин во многом зависят от правильной организации технологического процесса. В ее совершенствовании существенную роль может играть *график сетевого планирования*, который связывает два основных элемента планирования: *работу* (операцию) и *событие*.

На рис. 3 приведен график для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью до 10 кВт в укрупненных показателях. В нем работа (операция) изображена стрелкой, событие (конечный результат работы) — квадратом (можно и кружком). Пунктирными стрелками показаны фиктивные работы, не требующие больших затрат времени и труда.

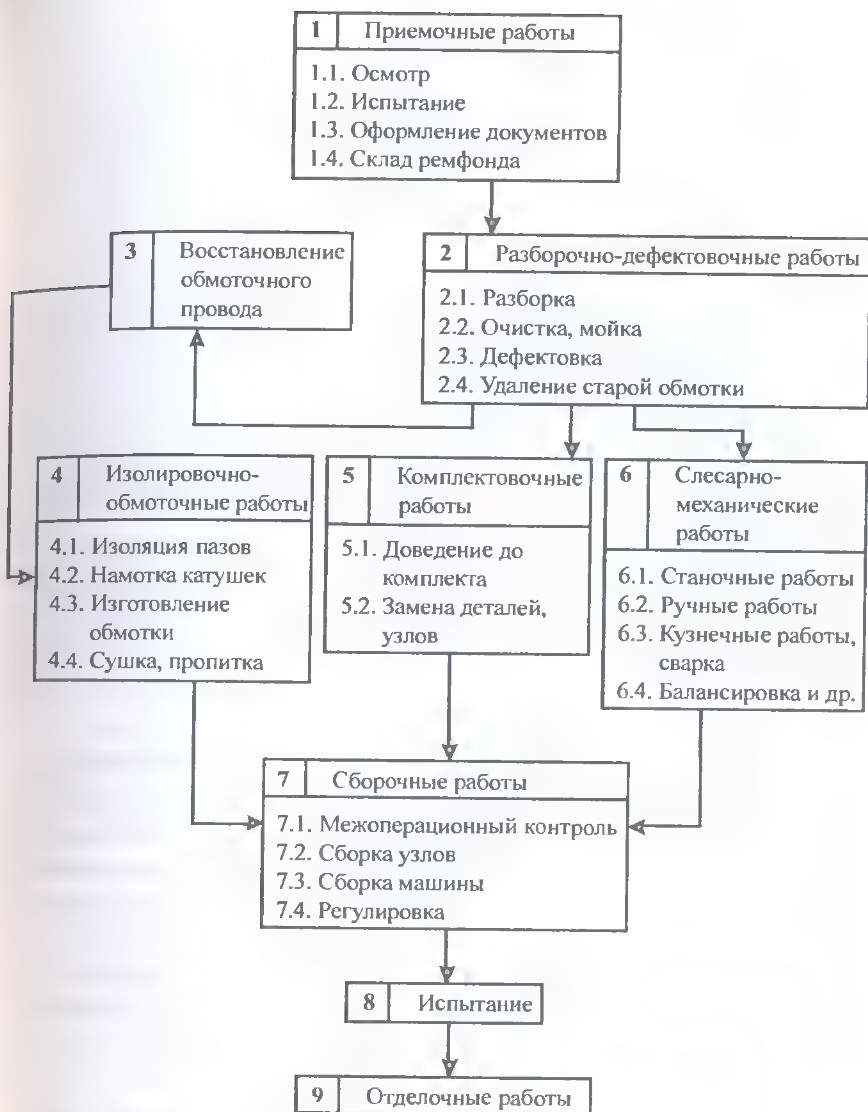



*Рис. 2. Схема технологического процесса ремонта электрических машин*

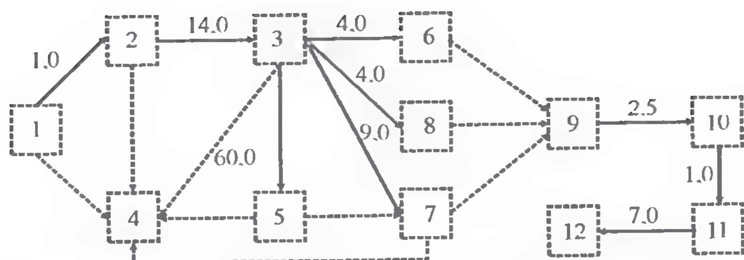



*Рис. 3.* График сетевого планирования ремонта электромашин: 1–2 – приемочные работы; 2–3 – разборочно-дефектовочные работы; 3–5 – восстановление обмоточного провода; 3–6 – слесарно-механические работы; 5–7 – подготовка обмоточного провода к работе; 3–7 – изолировочно-обмоточные работы; 3–8 – комплектовочные работы; 6–9 – передача деталей механической части на сборку; 7-9 – передача на сборку узлов с обмотками электромашин; 8–9 – передача на сборку комплектующих деталей; 9–10 – сборка двигателя; 10–11 – испытание; 11–12 – отделочные работы; 2–4 – сдача в металлолом непригодных к ремонту машин; 3–4 – сдача в металлолом деталей машин и обмоток, непригодных для восстановления; 7–4 – сдача в металлолом срезков проводов обмоток

В графике направление стрелок показывает порядок выполнения работ, цифры над стрелкой — продолжительность выполнения работ в часах. Она зависит от многих факторов (уровня механизации работ, приспособлений, квалификации работников и пр.). Время выполнения работ определяется хронометражем по среднестатистическим данным.

Непрерывная последовательность работ называется *путем*. Путь, который требует максимальной затраты времени от начала работы до завершения, называется *критическим*. Например, *критический путь* рис. 3 (без восстановления обмоточного провода) 1–2–3–7–9–10–11–12 — это фактическая продолжительность ремонта электрической машины на данном предприятии — 34,5 ч.

Сетевой график может быть более детальным по отдельным операциям каждого укрупненного вида работ, например, осмотр–испытание–оформление документации и т.д. со связкой каждого события.

Такие графики планирования ремонта дают возможность обеспечить ритмичную работу предприятия, выявить нестыковку в выполнении ремонтных операций. Например, на изолировочно-обмоточный участок недостаточно поступает статоров для намотки

обмоток. Расчет суммарного времени на выполнение разборочно-дефектовочных работ, а также на изолировочно-обмоточные работы электромашин дают возможность с учетом экономических соображений принять решение: увеличить число рабочих первого участка или ограничиться дополнительной механизацией. Могут быть приняты и иные решения.

# Глава 7. Приемочные работы

Приемочные работы выполняются на специально оборудованном участке или складе ремфонда предприятия. Для этого участки оснащаются приточно-вытяжной вентиляцией, подъемно-транспортными приспособлениями, специальными устройствами, монтерскими и слесарными инструментами, приборами для дефектации и т.п.

## 7.1. Осмотр

Осмотр выполняется визуально обычно на складе ремфонда или в разборочно-дефектовочном отделении предприятия.

Его цель — определение ремонтопригодности электромашин, предварительная оценка состояния узлов и деталей. При этом решается вопрос о возможности устранения причин отказов на данном предприятии.

Для его проведения электрическая машина и ее детали (статор с обмоткой, ротор, подшипниковые щиты и другие части) обязательно должны быть в достаточно чистом состоянии. Если при осмотре машины или ее деталей будут выявлены неисправимые повреждения (разбит корпус, отбито более двух лап, сильно поврежден магнитопровод, ранее ремонт был выполнен так, что исключает повторное восстановление и т.п.), то они в ремонт не принимаются.

Для проверки состояния подшипников, щеточно-контактного механизма, вентилятора и т.д. ротор машины проворачивают ру-

кой. В том случае, когда имеется доступ к обмотке, определяется степень старения изоляции.

Под *старением* изоляции понимается постепенное понижение ее *механической прочности* в процессе работы и хранения. Это связано с изменением структуры диэлектриков и их химического состава. *Электрические характеристики* изоляции (диэлектрическая прочность — $E_{ПР}$, диэлектрические потери — tgδ, удельное поверхностное сопротивление — $R_S$, удельное объемное сопротивление — $R_V$, диэлектрическая проницаемость — ξ) от степени старения практически не меняются.

Исходя из изложенного *степень старения изоляции определяется* только механической прочностью. По *методу прощупывания* изоляцию делят на 4 класса старения:

1 — изоляция мягкая, эластичная, это очень хорошая изоляция, обеспечивающая длительную работу электрической машины;

2 — изоляция на ощупь твердая, но при нажатии не дает видимых трещин, т.е. удовлетворительная, машина способна работать еще много времени;

3 — изоляция твердая, при нажатии появляются видимые трещины, расслаивается, однако от металла она отделяется только острым предметом, такая изоляция ограниченно годная (ненадежная);

4 — при нажатии изоляция осыпается, следовательно, к дальнейшей эксплуатации не пригодна.

## 7.2. Испытания

Они преследуют ту же цель, что и осмотр. Для исследований необходимы соответствующие приборы. Испытания выполняются в следующем объеме: определяется целостность обмоток, измеряется сопротивление изоляции, подшипники испытываются на нагрев.

*Целостность обмотки.* Чаще всего обрывы в обмотках выявляются мостом постоянного тока, пробником, омметром, мегомметром, включенным по схеме рис.4, *а*. В том случае, если приборы фиксируют замкнутый контур (в зависимости от прибора соответственно: сопротивление отвечает нормам или равно нулю, либо загорается лампочка), обрыва в обмотке нет.

*Сопротивление изоляции обмотки* определяется мегомметром по схеме рис. 4, *б*. Так измеряется сопротивление изоляции обмоток всех трех фаз относительно корпуса, если обмотки машины соединены в схему: «звезду» или «треугольник». Если обмотки электромашины не соединены в схему, замеряются сопротивления изоляции каждой обмотки относительно корпуса и между собой. Причем сначала замыкаются клеммы мегомметра на обмотку и только затем проворачивается ручка прибора или проводится его включение в сеть.

В соответствии с требованиями ПУЭ, допустимое сопротивление ($R$) изоляции обмоток статоров электродвигателей переменно-

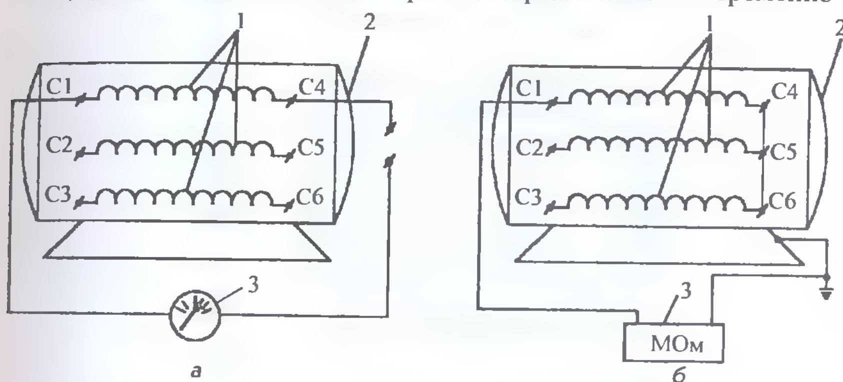



*Рис. 4.* Схемы определения обрыва в обмотках электрических машин (*а*) и сопротивления изоляции (*б*): *1* – обмотки, *2* – корпус, *3* – прибор

го тока напряжением до 1кВ, находящихся *в эксплуатации*, должно быть не менее 0,5 МОм, для обмоток роторов 0,2 МОм (при температуре 10–30°С).

Допустимое сопротивление изоляции электрической машины в МОм при температуре, близкой к рабочей, можно определять по выражению

$$R = \frac{U_{\text{Н}}}{1000 + 0{,}01 S_{\text{ДВ}}},$$

где $U_{\text{Н}}$ — напряжение обмотки электрической машины, В; $S_{\text{ДВ}}$ — мощность машины, кВ·А ($P_{\text{Н}}$ – кВт).

В Республике Беларусь, как правило, пользуются мегомметрами типа МОМ с генераторами постоянного тока на номинальное напряжение холостого хода 100, 250, 500, 1000, 2500 В. Широко применяются также мегомметры типа Ф4102 с питанием от сети переменного тока со встроенными выпрямителями на те же напряжения. Для измерения сопротивления изоляции обмоток электромашин переменного тока с номинальным напряжением 380/220 В используются мегомметры с напряжением 1000 В.

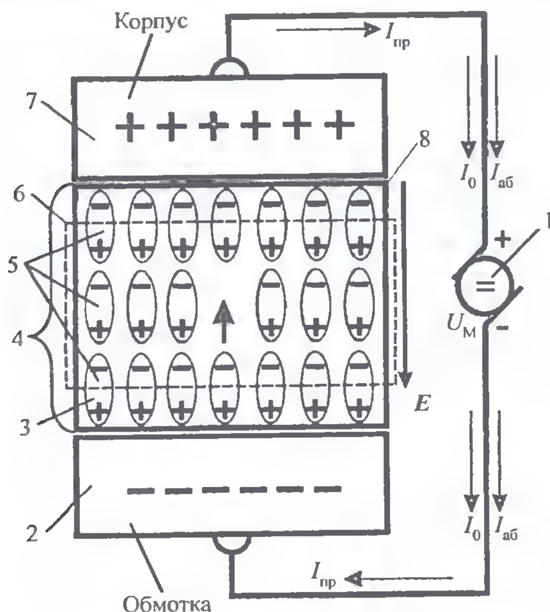



*Рис. 5.* Поляризация изоляции электрической машины

Показание сопротивления изоляции по прибору фиксируется через одну минуту, так как после приложения напряжения генератора мегомметра ($U_М$) к корпусу и обмотке (или между обмотками) в течение этой минуты в изоляции идет процесс поляризации. Он вызывает протекание во внешней цепи дополнительных абсорбционных токов ($I_{аб}$), что искажает величину фактического сопротивления этой изоляции.

Приложение напряжения $U_М$ от мегомметра *3* к контуру электромашины (рис. 4, *б*) можно рассматривать как его приложение к конденсатору рис. 5, только сложной конфигурации. Первой обкладкой *2* конденсатора является металл обмотки, второй (*7*) — металл корпуса (или другой обмотки), между которыми находится изоляция *4*.

Приложенное напряжение ($U_М$) «забирает» на обкладке конденсатора *7* электроны, что создает ее положительный потенциал, и перебрасывает их по внешней замкнутой цепи на обкладку *2*, что обусловливает ее отрицательный потенциал (так как теперь на ней избыток электронов). Процесс проходит мгновенно, и зафиксировать протекание такого тока (равного $I_0$) мегомметром невозможно.

Появление потенциалов на обкладках создает электрическое поле *E*, которое вызывает *упругое смещение связанных зарядов* в изоляции *4* и *ориентацию* образовавшихся *диполей 5* в электрическом поле. Этот процесс называется *поляризацией.* Упругое — это такое смещение, при котором снятие поля *E* возвращает все заряды изоляции в исходное положение. Поляризация приводит к тому, что показано на рис. 5.

Смещенные, упруго связанные (в образовавшихся диполях) заряды в толще изоляции *6* послойно уравновешивают друг друга (рис. 5, 6). В то же время заряды пограничных слоев *8* и *3* остаются неуравновешенными, чего не может быть в замкнутой цепи.

Для их уравновешивания во внешней цепи через обмотку генератора *1* между обкладками 2–7 протекает ток дополнительных зарядов, так называемый абсорбционный ток — $I_{аб}$. Величина и время его протекания зависят от видов поляризаций. Это значит, что ток цепи, т.е. утечки $I_{ут}$ будет равен (при $I_0 = 0$) сумме $I_{аб}$ и $I_{пр}$:

$$I_{ут} = I_{аб} + I_{пр},$$

где $I_{пр}$ — ток сквозной проводимости через конденсатор за счет наличия в изоляции небольшого числа свободных зарядов. Приблизительно все виды поляризации длятся около 1-й минуты, после чего $I_{аб}$ практически будет равен нулю и тогда $I_{ут} = I_{пр}$.

На рис. 6 графически показано изменение $I_{ут}$ в зависимости от времени τ ($I_{ут} = f(\tau)$) после приложения напряжения $U_М$ к изоляции машины. Из него следует, что ток, протекающий в течение минуты по цепи $I_{аб}$, занижает фактическую величину сопротивления изоляции электромашины, которую замеряет мегомметр (закон Ома — чем больше ток $I$, тем меньше сопротивление $R$). Вот почему сопротивление $R_{60}$, зафиксированное через 60 с, является *действительным сопротивлением изоляции машины* $R$, если в течение всей этой минуты напряжение $U_М$ было приложено постоянно и неизменно. Иначе, при снятии $U_М$ заряды вернутся в исходное положение и измерение $R$ надо начинать сначала.

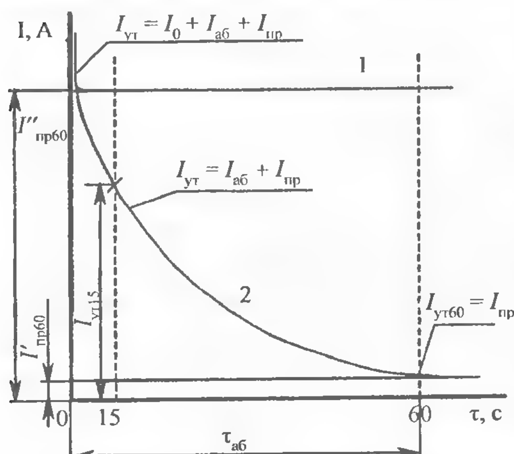


*Рис. 6.* Зависимость тока утечки от времени

Абсолютное значение $R_{60}$ не в полной степени характеризует состояние изоляции, так как на него влияют габариты машины, номинальное напряжение и пр. Кроме того, чем больше будет свободных зарядов в изоляции, тем больше $I_{пр}$, тогда как $I_{аб}$ практически не меняется. Поэтому вместе с сопротивлением $R_{60}$ для оценки изоляции широко используется еще один более объективный показатель — *коэффициент абсорбции,* который представляет собой отношение тока во внешней цепи через 15 с ($I_{ут15}$) к току через 60 с ($I_{ут60}$) или, что то же самое, $R_{60}$ к $R_{15}$, зафиксированных по мегомметру:

$$K_{аб} = \frac{I_{ут15}}{I_{ут60}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}.$$

По $K_{аб}$ можно судить о загрязнении и увлажнении изоляции, т.к. количество свободных зарядов в ней пропорционально ее со-

стоянию. При увлажнении (загрязнении) число свободных зарядов возрастает, а следовательно, растет ток $I_{ут60}$ (от $I'_{пр60}$ до $I''_{пр60}$). Вот почему при сухой и чистой изоляции зависимость $I_{ут} = f(\tau)$ на рис. 6 характеризуется кривой 2, при увлажненной и грязной — 1.

Для сухой, чистой изоляции коэффициент абсорбции $K_{аб}$ приблизительно равен 1,5–2, для второго случая близок к 1. Для электрических машин переменного тока мощностью до 500 кВт $K_{аб}$ не должен быть менее 1,1–1,2 (при температуре 10–30°С).

***Нагрев подшипников.*** Испытание проводится, если есть возможность включить электромашину в сеть. При этом проверяется не только нагрев подшипников, но на слух определяется характер шума при номинальной частоте вращения магнитного поля в расточке статора асинхронного двигателя.

При наличии у подшипников повышенного шума следует разобраться в причине, так как шум зависит не только от выработки деталей, но в значительной мере от посадки, осевого давления и пр.

Если подшипники качения находятся в хорошем рабочем состоянии, имеют чистую смазку, то температура их нагрева обычно составляет около 65°С и перегрев над температурой подшипниковых щитов не превышает 5–10°С. В соответствии с ГОСТом предельно допустимая температура нагрева таких подшипников — 100°С.

## 7.3. Оформление документации

Оформление выполняется в соответствии со стандартом, действующим на данном предприятии. Но в любом случае, даже в небольших мастерских при приемке машины в ремонт заполняется дефектовочный бланк (ведомость), в который, в частности, заносятся все паспортные (номинальные) данные: мощность ($P_{Н}$), напряжение ($U_{Н}$), ток ($I_{Н}$), частота тока ($f_{Н}$), частота вращения ротора ($n_{Н}$), коэффициент мощности ($\cos\varphi_{Н}$), КПД ($\eta_{Н}$), схема соединения обмоток (Y/Δ).

На крупных ремонтных предприятиях каждой машине присваивается ремонтный номер, который выбит на 5–6 жетонах, при раз-

борке электромашины они крепятся к ее узлам (ротору, подшипниковым щитам и пр.), тот же номер присваивается и металлической коробке, в которую складываются крепежные детали. Целесообразно в такие коробки наливать немного машинного или трансформаторного масла. Коробки предохраняют эти детали от повреждений, а пары масла — от коррозии.

Прошедшая осмотр, испытание и оформление машина размещается на складе.

## 7.4. Склад ремфонда

Размеры и оборудование склада зависят от ремонтного предприятия.

Одна из основных *задач хранения* — не допустить дополнительных повреждений электромашин. Для этого склады должны обеспечить минимальное воздействие окружающей среды на ремфонд, а следовательно, он должен располагаться как минимум под навесом. Для машин малой и средней мощности целесообразно иметь стеллажи, для крупных — полигоны. Следует обеспечить размещение, при котором возможен легкий доступ к любой электрической машине.

Склад должен иметь подъемно-транспортные приспособления: краны, кран-балки, электротали на поворотных балках, тельфера, электрокары и пр.

Все вместе со стропами они обязаны отвечать по грузоподъемности массам поднимаемых и транспортируемых машин. Подъем, как и транспортировку, следует проводить только за рым-болты, которые должны быть завернуты на все витки резьбы.

На складах крупных ремпредприятий, особенно при наличии обменного фонда, проводится сбор и сортировка электромашин по типам, мощностям, напряжению и частоте вращения ротора. Это дает возможность ремонтировать близкие по показателям машины крупными сериями. Такие серии дают возможность не проводить частых переналадок оборудования, позволяют использовать одни и те же электротехнические материалы, одни и те же приспособле-

ния и оборудование. Все вместе повышает производительность труда, улучшает качество ремонта и понижает его себестоимость.

*Обменным фондом* называют новое или капитально отремонтированное оборудование, предназначенное для обмена на ремонтопригодное, неработоспособное оборудование.

# Глава 8. Разборочно-дефектовочные работы

Капитальный ремонт электрической машины всегда связан с ее полной или частичной разборкой и сборкой. На эти работы, как показывает практика, затрачивается до 20 % и более всего времени ремонта.

Разборочно-дефектовочные работы выполняются в специально оборудованном отделении. Ему положено иметь приточно-вытяжную вентиляцию, металлические или деревянные (но обитые жестью) столы, подъемно-транспортные приспособления, слесарный и монтерский инструмент, желательно, централизованную систему трубопроводов сжатого воздуха, специальные приспособления.

Работы начинаются с разборки электрической машины.

## 8.1. Разборка электрической машины

*Разборкой* называется расчленение электрической машины на отдельные детали и узлы. Важнейшая задача — выполнить ее так, чтобы не допустить дополнительных повреждений в машинах и их составляющих.

Для этого перед разборкой, в частности, при сильной коррозии крепежных деталей все болты, гайки и места соединений смазываются трансформаторным или машинным маслом. Иногда на них целесообразно накладывать ветошь, смоченную маслами или керосином, другими органическими растворителями. Время воздействия

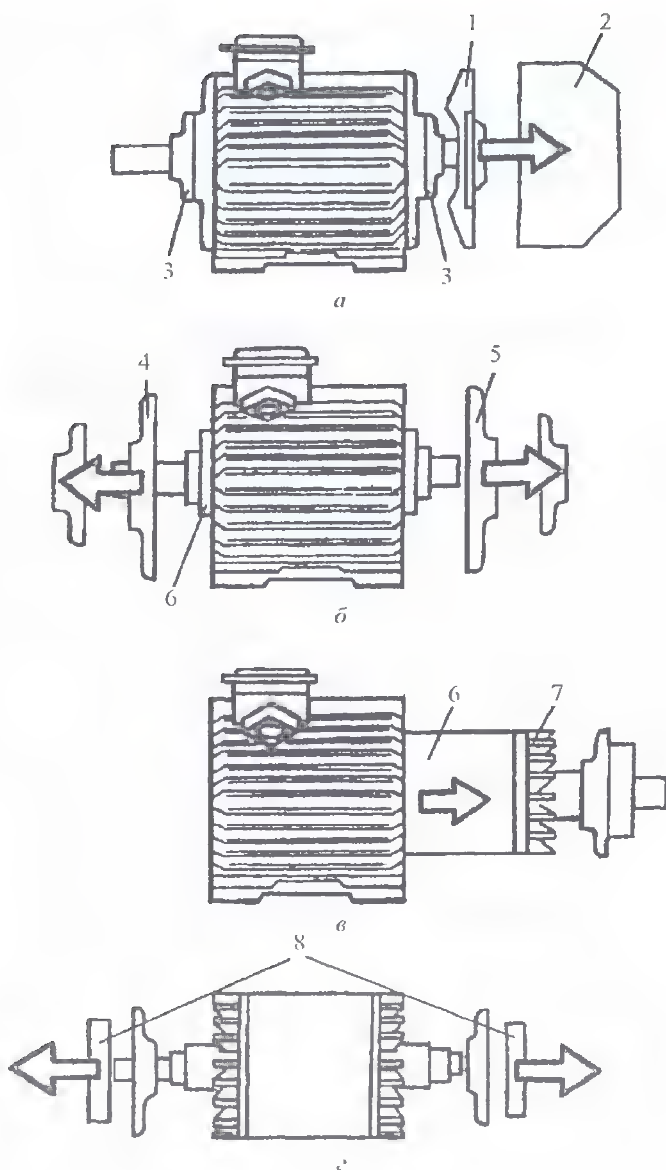



*Рис. 7.* Последовательность разборки асинхронного двигателя типа 4А (мощностью до 10 кВт)

растворителя определяется опытом: если гайка или винт не проворачиваются, его продлевают.

Порядок разборки, используемые приспособления и инструменты зависят от типа машины, ее мощности и особенностей конструкции. Для асинхронного двигателя серии 4А мощностью до 10 кВт с короткозамкнутым ротором, закрытого, обдуваемого исполнения порядок разборки следующий:

- снимается кожух вентилятора *2* (рис. 7, *а*). Для этого отвинчиваются винты его крепления к корпусу машины,
- снимается вентилятор *1*, при этом предварительно удаляется пружинное кольцо из канавки вала. Для съема в стальной втулке вентилятора часто имеются специальные отверстия с резьбой;
- удаляется крепеж, снимаются подшипниковые крышки *3*;
- снимается задний подшипниковый щит *5* (рис. 7, *б*), расположенный со стороны снятого вентилятора

Для снятия (после удаления болтов крепления щита) легкими ударами молотка из мягкого материала (из дерева, алюминия и т.п.) по кромке детали перемещают щит от корпуса вдоль вала. При этом вал ротора рукой или приспособлением придерживают на весу, чтобы предупредить его падение на статор, иначе можно повредить листы стали магнитопровода. Допустимо использование обычного молотка, но в этом случае необходимо применять мягкие прокладки. Часто при выполнении такой работы используют специальные приспособления, такие как универсальный винтовой съемник (рис. 8), или гидравлический передвижной съемник (рис. 9) и т.п.

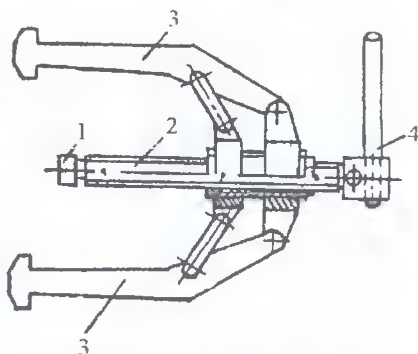


*Рис. 8.* Универсальный винтовой съемник: *1* — упор; *2* — винт; *3* — захват; *4* — рукоятка

Снимается передний щит *4* (расположенный со стороны привода), также предварительно снимаются болты крепления (рис. 7, *б*).

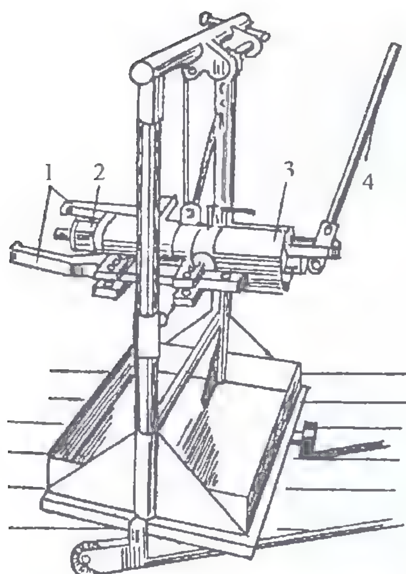


Рис. 9. Гидравлический передвижной съемник: *1* — захват; *2* — упор; *3* — плунжерный насос; *4* — рукоятка

Обычно он отделяется вместе с ротором *6*. Однако нередко последний после снятия подшипниковых щитов остается в расточке статора, тогда проводится специальная операция по выводу ротора (рис. 7, *в*).

По массе роторы делят на микро (0,01–0,1 кг), малые (0,1–3 кг), средние (3–1000 кг).

При удалении ротора необходимо следить, чтобы не повредить лобовые части обмотки, крылья вентилятора (на беличьей клетке), магнитопровод и другие детали. Вывод ротора из статора — одна из наиболее ответственных операций, малейшая небрежность приводит к серьезным повреждениям (нарушениям изоляции токоведущих частей, повреждению магнитопровода и др.). Малые роторы вынимают вручную, подложив в воздушный зазор электрокартон, или используя деревянные подставки под вал. Средние и крупные — с помощью приспособлений различных конструкций (в зависимости от конструкции и массы ротора), например, как на рис. 10.

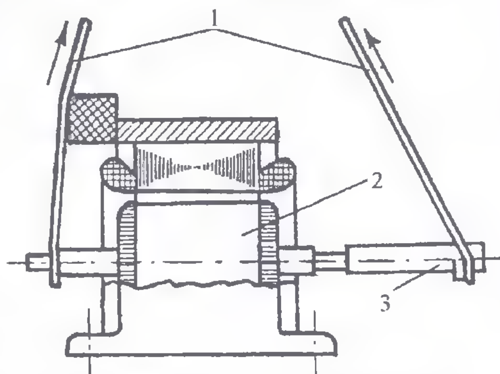


Рис. 10. Вывод ротора при помощи удлинителя: *1* — стропы; *2* — ротор; *3* — удлинительная трубка

Допустимо вынимать ротор и при съеме переднего щита. Но еще раз подчеркнем, что следует внимательно следить,

чтобы не допустить при выполнении этой операции повреждений других деталей машины.

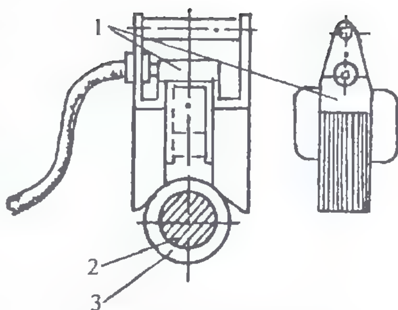


*Рис. 11.* Индуктор для нагрева подшипников на валу: *1* — индуктор; *2* — вал; *3* — подшипник

Обычно шарикоподшипники (*8*) остаются на валу ротора и снимаются с него съемниками лишь в случаях их замены или ремонта деталей ротора (рис. 7, *г*).

У асинхронных электродвигателей с фазным ротором при снятии заднего щита (расположенного со стороны контактных колец) вначале снимают кожух, затем вынимают щетки и, наконец, отвинтив крепящие болты, снимают корпус колец. При этом отпаивают соединительные хомутики от выводных концов. Снятие и разборку контактных колец выполняют только в случае их ремонта так же, как и коллекторов машин постоянного тока.

При разборке узлов, детали которых соединены с большим натягом (подшипник с валом и др.), если съемка вызывает «задир» металла на посадочном месте, используют разогрев деталей, например, поливом снимаемой детали горячим маслом. Отдельные ремонтные предприятия используют для этой цели установки индукционного нагрева (рис. 11). Магнитный поток, проходя через насаженную деталь, разогревает ее вихревыми токами. После разборки электрической машины ее детали и узлы очищают или проводят мойку.

## 8.2. Очистка и мойка деталей

*Очистка* — удаление загрязнений с поверхности деталей и узлов любым способом (щеткой, сжатым воздухом и пр.), *мойка* — удаление загрязнений с помощью моющих средств.

Это одна из ответственных операций, так как дает возможность в дальнейшем провести качественную дефектацию деталей, а также оценить целесообразность их восстановления в процессе ремонта.

На практике чаще всего используются следующие методы мойки механических деталей.

*Удаление загрязнений с помощью органических растворителей* (керосина, машинного или трансформаторного масла и др.). Этими растворителями смачивается ветошь и протираются детали.

*Достоинство:* простота, не требуется специальных, сложных приспособлений. Для малых мастерских метод экономичен. *Недостатки:* в определенной мере токсичен, много ручной, мало производительный работы. Можно использовать при относительно слабых загрязнениях.

Метод рационален как дополнительный к другим способам или на предприятиях с небольшим ремфондом.

*Мойка погружением в моечный раствор* (рецепты смесей для растворов приведены в справочниках, можно также использовать готовые составы).

Для мойки детали опускают в емкость с раствором, где они при температуре окружающей среды выдерживаются требуемое время, которое определяется экспериментально Наилучшие результаты такая мойка даст при наличии вибрации раствора или при перемещении в нем деталей.

*Достоинство:* более высокая производительность, чем в первом случае, большая экономичность, простота, относительно хорошее качество очистки, возможность механизации труда. *Недостатки:* требуются моющие средства или их составные части, нужное оборудование, при некоторых видах загрязнений такой метод бывает недостаточен. Он целесообразен на предприятиях с достаточным объемом ремфонда.

*Выварка в моющей жидкости.* Детали помещают в емкость с моющей жидкостью (водой, спецсоставом и т.п.), нагретой до температуры 80–90°С, иногда до 100°С и выдерживают требуемое время.

*Достоинство:* достаточно высокое качество очистки, детали очищаются практически от любых загрязнений (особенно при использовании дорогих растворов). *Недостатки:* требуется специальное оборудование, наличие спецрастворов, относительно сложная технология, увеличенный расход энергоносителей

Применяется там, где детали машин имеют повышенное загрязнение или удаление их другими методами эффекта не дает

*Мойка в струе моющего раствора.* В камеры устройств разнообразных конструкций с расположенными в них деталями, подлежащими мойке, по трубам под давлением, через сопла или разбрызгиватели подается моющий раствор (например, кальцинированной соды). Он может быть нагрет до 60–90°С. Лучшее качество мойки получается при перемещении деталей относительно струи, либо струи моющего раствора относительно деталей (рис. 12).

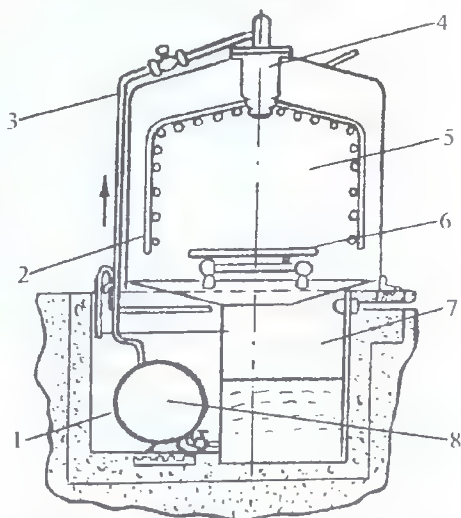


*Рис. 12.* Моечная машина с вращающимися разбрызгивателями: *1* — бак; *2* — разбрызгиватель; *3* — трубопровод; *4* — распределитель; *5* — моечная камера; *6* — тележка для деталей; *7* — приемный бак; *8* — центробежный насос

Распределитель (*4*) с разбрызгивателями (*2*) вращаются реактивной силой струи моющего раствора вокруг деталей, уложенных на тележке (*6*) в камере (*5*)

*Достоинство:* высокая производительность при повышенном качестве мойки, лучшем, чем при простом погружении. *Недостатки:* сложное специальное оборудование и технология мойки, энергоемкость, обычно требуются различные (в зависимости от загрязнения) моющие составы. Метод широко используют, как правило, крупные предприятия.

Иногда бывает желательно и целесообразно при сильном загрязнении провести *мойку обмотки* электрической машины. В этом случае магнитопровод с обмоткой погружают в моющий раствор или просто в воду, подогретые до 70–90°С, можно и струей моющего раствора или горячей воды. И в первом, и во втором случаях после удаления грязи обязательна сушка. Рационально после про-

цедуры сделать пропитку обмотки в лаках с последующей сушкой. Мойка с пропиткой, по данным производства, значительно удлиняет срок службы машин.

После очистки (мойки) производится окончательная дефектация деталей, а также узлов машин.

## 8.3. Дефектация электрической машины

Под *дефектацией* понимается определение неисправностей (дефектов) электрической машины.

Выявление дефектов начинается еще с приема машины в ремонт и продолжается до заключительной стадии разборочно-дефектовочных работ. Однако некоторые неисправности могут быть выявлены и позже при выполнении других работ. Тем не менее они по выявлению тоже вносятся в дефектную ведомость.

Дефекты делят на две большие группы: неисправности в механической и в электрической частях. Причем, как показывает практика, на первые приходятся около 20 % всех повреждений, на вторые — приблизительно 80 %. Исходя из этого и дефектацию также делят на *механическую и электрическую.*

Оба вида дефектации могут выполняться и параллельно разными бригадами, и последовательно одной.

*Дефектация механической части* проводится для определения состояния узлов и деталей, а также степени их пригодности к дальнейшей эксплуатации.

Выполняется она методами *осмотра и измерения* со сравнением полученных результатов с допустимыми величинами выработки. Нормы допустимых отклонений приведены в инструкциях и справочниках. При дефектации следует иметь в виду, что наиболее часто имеют повреждения такие детали и узлы электрических машин, как подшипники, вентиляторы, коробки выводов, щеточные механизмы. Выявленные неисправности заносятся в дефектную ведомость.

*К общим* неисправностям почти всех металлических деталей электрических машин следует отнести: окисления поверхностей,

выработку посадочных мест, трещины, прогибы, вмятины, забоины, заусенцы. Вместе с ними каждая деталь или узел может иметь *характерные* дефекты.

Узлы и детали асинхронных двигателей серии 4А с короткозамкнутым ротором (рис. 13) чаще всего имеют *дополнительно* свои дефекты.

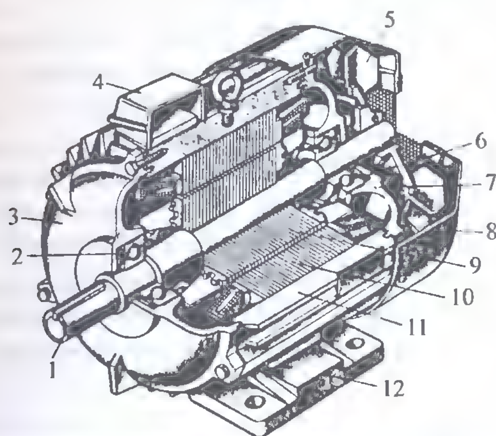



*Рис.13.* Трехфазный асинхронный двигатель серии 4А с короткозамкнутым ротором: *1* — вал; *2, 6* — подшипники; *3, 7* — подшипниковые щиты; *4* — коробка выводов; *5* — вентилятор; *8* — кожух вентилятора; *9* — магнитопровод ротора с короткозамкнутой обмоткой; *10* — магнитопровод статора с обмоткой; *11* — корпус; *12* — лапы

*Корпус* — износ посадочных мест подшипниковых щитов; откол лап; нарушение резьбы отверстий; трещины (в продольном и в поперечном направлениях они не должны превышать 50 % длины и ширины корпуса по окружности). Повреждение ребер охлаждения (их дефекты не должны существенно влиять на нагрев машины при номинальной нагрузке).

По экспериментальным данным такое влияние на нагрев машины становится заметным при сокращении площади ребер более чем на 10–15%. Неисправности определяются измерениями и визуально.

*Подшипниковые щиты* — износ посадочных мест с корпусом и гнезд под подшипники, трещины. При дефектации оценивается возможность заварки трещин без деформации щитов и наварки посадочных мест. Неисправности определяются визуально и замерами.

*Вал* имеет характерные повреждения: забоины, задиры, износ шеек под подшипники и выходных концов, разрушение шпоночной канавки, излом; к тому же прогиб вала (он допускается до 0,1 мм на 1 м длины); ослабление посадки магнитопровода. Неисправности определяются визуально и замерами. Прогиб чаще всего устанавливается индикатором часового типа.

*Подшипники качения* — основные дефекты: повреждения посадочных мест; трещины на обоймах; вмятины; деформации сепараторов; дефекты беговых дорожек и тел вращения (шелушение шариков, роликов, выработка дорожек и т.п.), цвета побежалости на деталях. Неисправности определяются визуально и измерениями.

Выработка подшипника устанавливается покачиванием рукой верхней обоймы в осевом и радиальном направлениях (обычно до съема подшипника с вала) — ощущения смещения не должно быть. Выработку устанавливают замерами зазоров подшипников качения индикатором часового типа (рис. 14, *а*, *б*) после снятия с вала ротора машины.

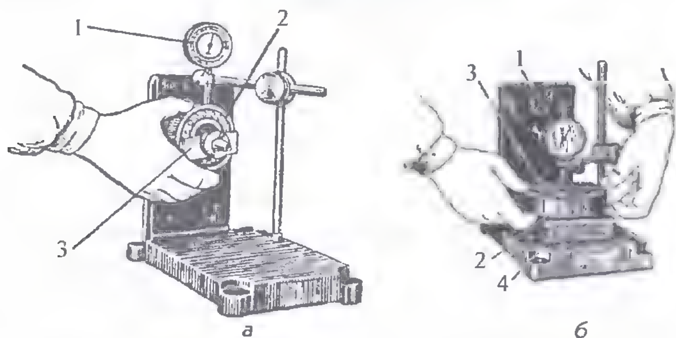



*Рис. 14.* Измерение зазоров шарикового подшипника радиального (а), осевого (*б*):
*1* — индикатор; *2* — шариковый подшипник; *3* — крепление; *4* — бруски

При этом для измерения радиального зазора внутренняя обойма закрепляется, для измерения осевого – внешняя обойма укладывается на бруски.

Данные измерений сравниваются по заводским таблицам с допустимыми. Если зазоры находятся в пределах норм, состояние подшипника удовлетворительное, он может использоваться и далее.

*Магнитопровод*, основные повреждения (рис. 13) — расслоение листов активной стали по торцам пакета (распушение); наличие цветов побежалости на листах стали; оплавление участков стали; выпадание отдельных зубцов листов стали; местные механические повреждения (задиры и пр.). Вмятины не должны превышать 5 % общей поверхности в расточке статора. К указанным повреждениям надо добавить ослабление прессовки пакетов стали и их крепления на местах (смещение линии пазов по длине недопустимо более 20 %), а также разрушение межлистовой изоляции. Неисправности в основном определяются визуально.

У асинхронной машины с фазным ротором после снятия поврежденной обмотки проверяется также эксцентриситет магнитопровода ротора в радиальном направлении (он не должен превышать 5 % воздушного зазора). Неисправность определятся индикатором часового типа. Роторная обмотка в магнитопроводе короткозамкнутых асинхронных машин (беличьи клетки, рис. 15) может иметь дефекты: нарушение соединения между стержнями и короткозамыкающими кольцами; разрывы и трещины на них; смещение «беличьей» клетки в осевом направлении; изгиб стержней; погнутые или сломанные вентиляционные лопатки (допустимо их отсутствие не более двух) и т.п. Неисправности определяются визуально.

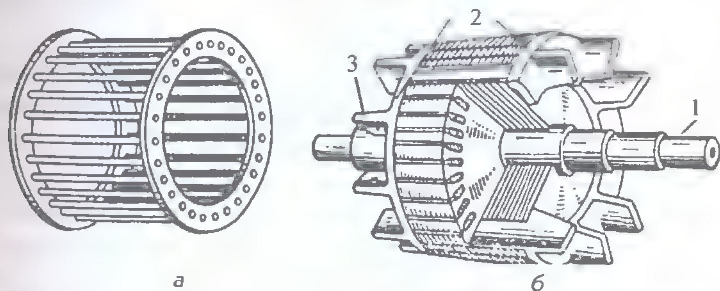



*Рис. 15.* Короткозамкнутый ротор (обмотка — «беличья клетка» сварная (*а*), литая (*б*)): *1* — вал; *2* — короткозамыкающие кольца; *3* — вентиляционные лопатки

Разрывы стержней в пазовой части можно установить только с помощью специальных приборов, например, электромагнита со стальной пластинкой (рис.16).

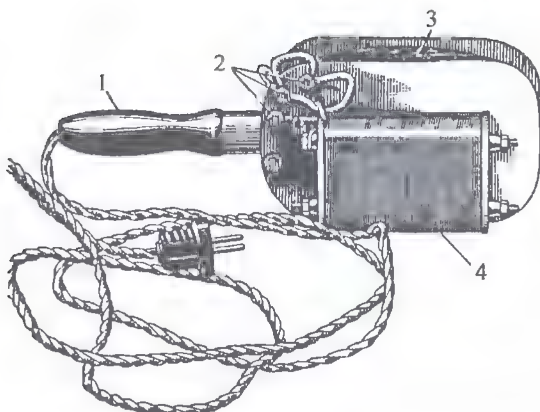



*Рис. 16.* Электромагнит: *1* – ручка; *2* – выводы для регулировки магнитного потока; *3* – обмотка; *4* – магнитопровод

*Вентилятор* (рис.13) — погнутость, отсутствие лопаток, осевое и радиальное биение; ослабление крепления втулки на валу; на кожухе вмятины; прогиб перемычек; повреждения крепежных деталей, их утрата. Неисправности определяются визуально.

*Коробка выводов* — трещины корпуса; подгары, прогары клеммного щитка; отсутствие наконечников выводов, крепежных деталей и маркировки концов обмоток; повреждение резьбы крепежных болтов; их утрата. Неисправности определяются визуально.

*Контактные кольца обмоток* трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором (рис. 17) — биение в радиальном направлении (эксцентриситет допустим 0,1 мм при частоте вращения ротора не более 1000 мин$^{-1}$ и 0,05 мм – более 1000 мин$^{-1}$); биение в осевом направлении не допускается свыше 3–5% ширины контактного кольца. Поверхность должна быть зеркально чистой (без эрозии, царапин, шероховатостей, подгаров, потемнений и т.п.); кольца — без разрывов, трещин, заметной выработки, а их изоляция — надежной. Сокращение толщины колец более чем на 50 % от первоначальной требует их замены. Если толщина кольца неизвестна. минимально допустимую берут равной 8–10 мм. Неисправности определяются визуально и измерениями.

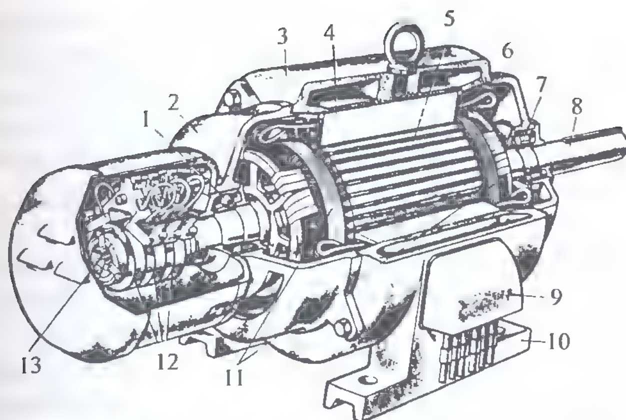



*Рис. 17.* Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором: *1,7* – подшипники; *2,6* – подшипниковые щиты; *3* – корпус; *4* – сердечник статора с обмоткой; *5* – сердечник ротора; *8* – вал; *9* – коробка выводов; *10* – лапы; *11* – бандаж; *12* – контактные кольца; *13* – контактно-щеточный механизм

*Коллектор* — машина постояного тока (рис. 18.) Характерные повреждения: подгары, эрозия, шероховатости, потемнения контактных пластин; превышения изоляции над пластинами; поломка и распайка петушков; ослабление прессовки коллектора; плавление

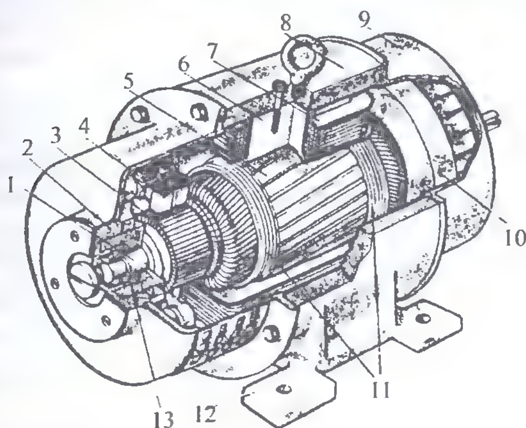



*Рис. 18.* Устройство машины постоянного тока: *1* – вал; *2, 9* – подшипниковые щиты; *3* – коллектор; *4* – контактно-щеточный механизм; *5* – сердечник ротора с обмоткой; *6* – сердечник главного полюса; *7* – полюсная катушка; *8* – корпус (станина); *10* – вентилятор; *11* – бандажи; *12* – лапы крепления; *13* – подшипник

и выгорание пластин; пробой изоляции между ними, а также между ними и корпусом; биение коллектора (диаметром до 250 мм в радиальном направлении допустимо не более 0,02 мм, в осевом — 2–3 мм). Нормы износа коллекторных пластин до предельного состояния устанавливается заводом-изготовителем, обычно предел толщины пластин — 3–10 мм. Неисправности определяются визуально и замерами.

*Бандажи* (рис.17, 18) — разрывы; окисление; разрушение; распайка; сползание бандажей; нарушение изоляции под бандажами. Неисправности определяются визуально, измерениями.

*Контактно-щеточный механизм* (рис. 17–19) — неправильная установка щеток на коллекторе. Правильная — с перекрытием на нем дорожек от щеток. Механические повреждения щеточных обойм, их оплавление. Повреждения изолированного пальца и изоляции других элементов механизма. Ослабление пружин; обрыв контактных тросиков и нарушение их креплений; срыв резьбы винта регулировки; повреждения щеток. Площадь соприкосновения щеток с кольцами или коллектором должна быть не менее 80 % от их поверхности. Марки щеток должны соответствовать инструкциям. Неисправности определяются визуально.

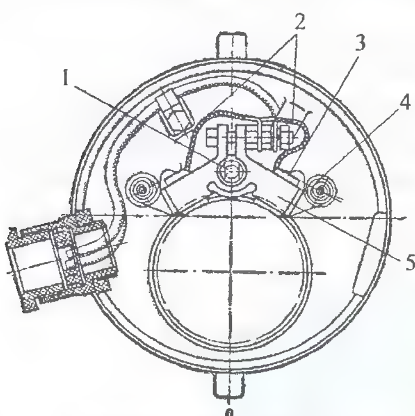



*Рис. 19.* Контактно-щеточный механизм асинхронной машины с фазным ротором: *1* — изолированный палец; *2* — тросики; *3* — щетка; *4* — прижимная пружина; *5* — щеточная траверса

*Крепежные детали* (болты, винты, гайки и пр.) — механические повреждения граней; разрушение головок; срыв резьбы; некомплектность. Неисправности определяются визуально.

*Дефектация электрической части* проводится методами осмотра и измерения соответствующих параметров сравнением результатов с допустимыми нормами. Цель ее — определение состояния

и пригодности обмоток для дальнейшей работы. При ее проведении решается вопрос объема и методов восстановления электрической части машины. Выявленные неисправности заносятся в дефектную ведомость.

*К общим* неисправностям обмоток относятся: естественное и ускоренное (по каким-либо причинам) старение изоляции, ее низкое сопротивление и электрическая прочность, разрывы провода, замыкание обмоток на корпус, короткое замыкание витков в секциях.

*Замыкание обмотки электрической машины переменного тока на корпус* (10–15 % от всех повреждений в обмотках). Место замыкания можно установить по схеме, которая собирается после того, как определена обмотка с изоляцией, пробитой на корпус (рис. 20).

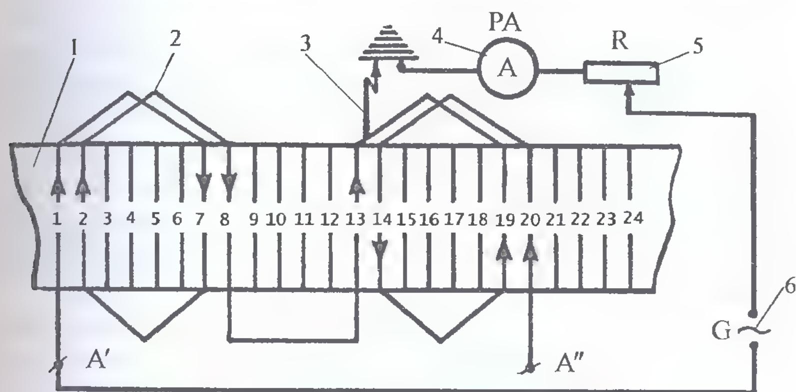



*Рис. 20.* Схема определения места замыкания статорной обмотки на корпус асинхронной машины: *1* — магнитопровод с пазами; *2* — обмотка, имеющая замыкание на корпус; *3* — место замыкания; *4* — амперметр; *5* — добавочное сопротивление, *6* — источник тока

При подключении обмотки к электрической сети переменного тока (с пониженным напряжением 6–24 В) по созданному контуру потечет ток, величину которого (по амперметру) можно регулировать при помощи ограничивающего сопротивления (реостата). Ток не должен превышать номинального значения для данной машины.

Поскольку ток переменный, вокруг проводников обмотки образуется переменное электромагнитное поле, поэтому пазы с этими проводниками легко определяются с помощью ферромагнитной

пластинки — она залипает на пазах и дребезжит. Такое явление дает возможность легко найти секции, по которым протекает ток от конца фазной обмотки до места замыкания ее на корпус.

Для уточнения найденного места замыкания обмотки провод отсоединяют от одного ее конца (А′) и подсоединяют к другому (А″). Определение места замыкания повторяют. При однократном замыкании обмотки найденные места замыканий в первом и во втором случаях совпадают.

Тем же методом можно воспользоваться для установления места замыкания между обмотками двух фаз. Но в этом случае напряжение подается вначале к одним концам обмоток замкнувшихся фаз (которые определяются по мегомметру), а затем к другим.

Для нахождения места соединения обмотки с корпусом электрической машины или места соединения обмоток разных фаз могут быть использованы и электронные приборы (например, типа ЕЛ 1).

*Витковые замыкания в обмотках* машин переменного тока, как показывает практика, составляют 80–85 % всех повреждений.

Для определения наличия и мест расположения дефектных секций с короткозамкнутыми витками в пазах магнитопровода электрической машины широко используется подковообразный электромагнит (рис.16) с ферромагнитной пластиной.

Чтобы найти поврежденные секции, такой электромагнит вводится в расточку магнитопровода статора машины (рис. 21). При подключении обмотки к электрической сети по ней потечет ток, который создаст переменный магнитный поток Ф в магнитных системах электромагнита и исследуемой электромашины. Поток, пересекая активные проводники секций обмотки, индуктирует в них ЭДС ($E$).

Последняя при отсутствии замыканий в витках не создает тока, поэтому введенная в расточку пластина не залипает над пазами рис. 21, *а*. При наличии замыкания в секции ЭДС ($E$) в замкнутых витках создает ток $I_{пр}$, который в свою очередь создает свой магнитный поток $Ф_{пр}$ вокруг проводников, по которым он протекает. Появление тока ($I_{пр}$) фиксирует стальная пластина – она залипает и вибрирует (рис. 21, *б*).

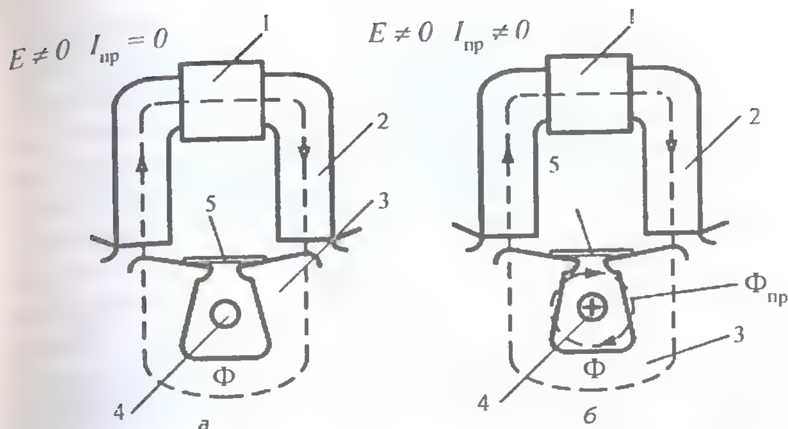



*Рис. 21.* Принцип работы электромагнита при отсутствии (*а*) и наличии (*б*) виткового замыкания в секции обмотки электрической машины: *1* — обмотка электромагнита; *2* — магнитопровод электромагнита; *3* — магнитопровод электромашины с зубцами; *4* — активные проводники секции; *5* — ферромагнитная пластина

В качестве датчика появления магнитного потока вместо пластины может использоваться второй электромагнит с подачей сигнала на гальванометр (рис. 22) или отклоняющие пластины кинескопа прибора типа ЕЛ-1 (рис. 23, *а*).

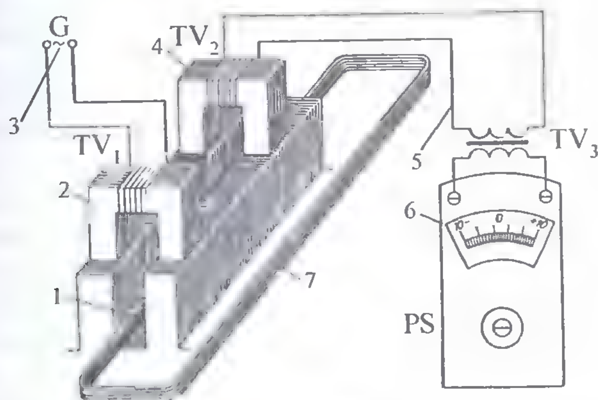



*Рис. 22.* Схема установки для определения виткового замыкания при помощи двух электромагнитов и гальванометра: *1* — паз магнитопровода электромашин; *2* — возбуждающий электромагнит; *3* — источник питания; *4* — воспринимающий электромагнит; *5* — трансформатор; *6* — гальванометр; *7* — испытуемая секция

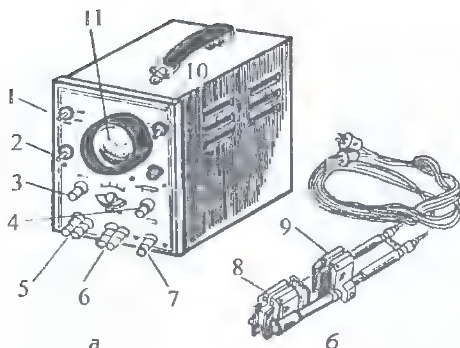



*Рис. 23.* Прибор ЕЛ-1: *1* — тумблер анода; *2* — тумблер сети; *3* — амплитуда импульса; *4* — фокус; *5* — выход импульса; *6* — сигнал явления; *7* — заземление; *8* — неподвижный электромагнит; *9* — подвижный электромагнит; *10* — масштаб развертки; *11* — кинескоп

В расточке статора параллельно пазам располагается приспособление прибора (рис. 23, *б*). Оно имеет два П-образных электромагнита: неподвижный и подвижный. Посылаемые через катушку неподвижного (возбуждающего) электромагнита импульсы тока высокой частоты от прибора ЕЛ-1 (рис. 23, *а*), как и в рассмотренном выше случае, наводят в проводниках, расположенных под ним, ЭДС. При замыкании в витках секции магнитное поле от них $Ф_{пр}$ воспринимается катушкой подвижного электромагнита и ЭДС от этого поля подается на вертикально отклоняющие пластины кинескопа прибора, вызывая отклонение луча (его раздвоение).

Все неисправности обмоток роторов машин переменного тока с фазным ротором определяются так же, как и для статорных обмоток. Некоторую особенность представляют только исследования обмоток асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами.

***Разрывы стержней короткозамкнутых обмоток*** (беличьих клеток) находятся с помощью рассмотренных приборов, показанных на рис. 21–23. Принцип работы тот же. Отличие при исследовании только в том, что при разрыве стержня (так как ток по нему не протекает) стальная пластина над этим пазом не залипает и не вибрирует, а над пазами с целыми стержнями — залипает и дребезжит. Соответственно, при измерениях по схеме рис. 22 гальванометр не дает отклонения стрелки, а у прибора ЕЛ-1 нет раздвоения луча на кинескопе.

Разрывы стержней можно определять и с помощью ферромагнитных (стальных) опилок. Тогда к короткозамкнутым кольцам беличьей клетки ротора асинхронного двигателя подводится от источника постоянного тока пониженное напряжение. Над ротором размещается лист с ферромагнитными опилками. Под действием магнитного поля целого стержня (поскольку по нему протекает ток) опилки располагаются над ними, копируя его. При обрыве стержня тока нет — это четко фиксируют опилки. В машинах постоянного тока определение некоторых указанных неисправностей имеют особенности.

*Замыкание обмотки электрической машины постоянного тока на корпус.* Наличие металлического замыкания в основном обнаруживается мегомметром. Для той же цели можно использовать мост постоянного тока, тестер, омметр, пробник. Место замыкания находится методом милливольтметра: по изменению полярности падения напряжения на двух соседних пластинах коллектора.

Для исследования собирается схема (рис. 24). От источника питания напряжение G постоянного тока (12–36 В), через реостат (*5*) и амперметр (*4*) подается на одну из пластин коллектора (*2*) и корпус машины (*1*). По замкнутому контуру потечет ток, создающий на каждой секции обмотки якоря (подсоединенной к двум соседним пластинам коллектора) падение напряжения. Оно измеряется милливольтметром (*3*). Так как к месту замыкания обмотки на корпус ток от коллекторной пластины течет по двум встречным путям, на пластинах, соединенных с поврежденной секцией, показание прибора (*3*) изменит знак.

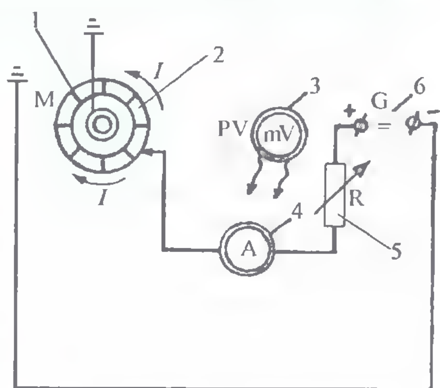


*Рис. 24.* Схема определения места замыкания обмотки на корпус

Кроме общих неисправностей обмоток электрических машин, имеются и чисто спе-

цифические неисправности обмоток машин постоянного тока. Большинство из них находятся универсальным методом милливольтметра, основанного на изменении величин падения напряжения в секциях или изменении его полярности.

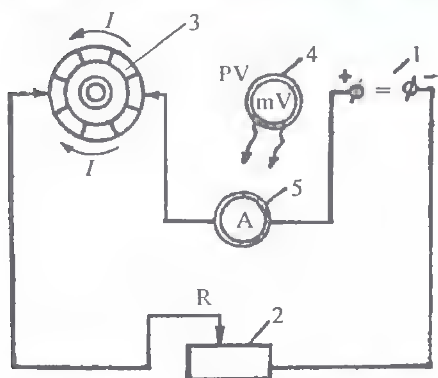



*Рис. 25.* Схема исследования якоря машины постоянного тока универсальным методом милливольтметра

При исследовании якоря таким методом собирается схема (рис. 25).

Через обмотку якоря пропускают постоянный ток (20–30 % номинального) от какого-либо источника (*1*) (аккумулятор, генератор постоянного тока, выпрямитель). Величина тока по амперметру (*5*) регулируется реостатом (*2*). Ток в якорную обмотку подводится по проводникам, контакты которых наложены на пластины коллектора (*3*) с расстоянием друг от друга, равном полюсному делению. Питание якоря в этом случае соответствует питанию через щетки.

Проводники удерживаются бандажом из изоляционной ленты (или специальным хомутом). Щупами, соединенными с вольтметром или милливольтметром (*4*), измеряется падение напряжения между соседними пластинами коллектора.

В зависимости от неисправностей якорной обмотки показания прибора *4*, как это следует из рис. 26, будут следующими:

- *при замыкании между витками соседних секций* (рис. 26, *а*) прибор дает понижение отклонения милливольтметра на пластинах, соединенных с этими секциями, так как понижается сопротивление секций;
- *при замыкании между витками одной секции* (рис. 26, *б*) напряжение понизится только на двух рядом лежащих пластинах коллектора. Внимание! Следует иметь в виду, что замыкание одного — двух витков в многовитковой секции практически

не дает заметного понижения напряжения. В этом случае для определения неисправности следует воспользоваться электромагнитом (рис. 16);

*при замыкании между соседними коллекторными пластинами* (рис. 26, *в*) не будет отклонения стрелки милливольтметра, так как падение напряжения практически равно нулю;

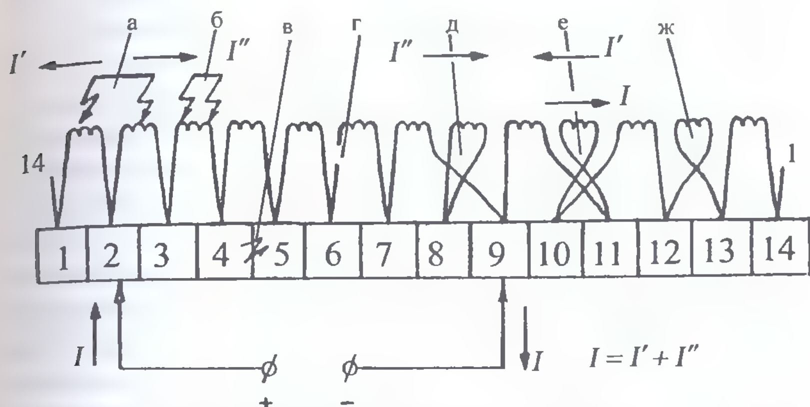



Рис. 26. Развернутая схема обмотки якоря с неисправностями

*при обрыве в обмотке* (рис. 26, *г*) отклонение стрелки прибора на всех пластинах отсутствует – тока нет, кроме одной пары (на каждую пару полюсов), где отклонение достигает опасной для милливольтметра величины, что следует учитывать при исследовании;

*при замыкании одной секции на себя* (рис. 26, *д*) не дает отклонения на двух парах пластин через секцию — тока нет. Внимание! Такие же показания будут иметь место и при нарушении пайки на коллекторной пластине, если концы соседних секций при этом остались между собой соединенными;

*«двойной крест», который получается при перекрещивании концов двух секций через третью между ними,* имеет место в обмотках из круглого провода (рис. 26, *е*). Выявляется он по двум повышенным отклонениям милливольтметра между пластинами и обратным отклонением стрелки прибора между ними, так как в этой секции меняется направление тока;

- *простой крест* (рис. 26, *ж*) не может быть обнаружен методом милливольтметра. В этом случае напряжение постоянного тока от источника подводится к коллектору не как показано на рис. 25, а к каждой паре рядом лежащих пластин поочередно. Компасом, который устанавливается перпендикулярно к плоскости секций, проверяется их полярность. Изменение полярности указывает на наличие «креста»;
- *при замыкании между проводниками верхнего и нижнего слоев обмотки* (если она двухслойная) дает пониженное отклонение стрелки на большой группе пластин. При обходе пластин коллектора в одном месте или при волновой обмотке в нескольких местах (по числу пар полюсов) изменяются показания милливольтметра, сохраняющиеся дальше на значительном числе пластин.

*В обмотках возбуждения полюсов* чаще всего повреждаются переходные соединения, выводные концы и места их прохода через корпус. К наиболее распространенным дефектам следует отнести: замыкание обмоток на корпус, обрыв или плохой контакт в обмотках. Методы определения указанных повреждений принципиально ничем не отличаются от ранее разобранных.

В заключение дефектации проверяется балансировка ротора электрической машины. Для этого он помещается на призмы станка и фиксируется в нескольких положениях. В каждом из них ротор не должен самопроизвольно проворачиваться.

## 8.4. Удаление старых обмоток

Это одна из наиболее трудоемких операций. Делается она только в том случае, если при дефектации установлено, что старая обмотка для дальнейшей эксплуатации непригодна: класс степени старения изоляции — третий или четвертый, обмотка имеет обрыв провода и т.п.

Перед удалением обмотки, если изменений в ней не будет, снимаются все данные для ее повторного изготовления при ремонте: тип, материалы и конструкция пазовой изоляции, марка и диаметр

обмоточного провода, число секций в катушечной группе и число витков в секции, число катушечных групп, число параллельных ветвей и сечений, длина витка, шаг.

Решается вопрос о восстановлении обмоточного провода.

Старые обмотки удаляются одним из следующих способов: механическим, термомеханическим, химическим, термохимическим. При выборе метода удаления учитываются: достоинства и недостатки методов, конструкции ремонтируемых машин, возможности ремонтного предприятия, экономические соображения.

*Механический метод* удаления обмоток из магнитопровода выполняется без предварительного разрушения старой изоляции.

Порядок операций следующий: из верхней части пазов выколачиваются клинья, крепящие обмотку, фрезой или резцом на станке (зубилом и молотком вручную) срезается лобовая часть обмотки с одной стороны сердечника, после закрепления корпуса машины на столе ломиком или приспособлениями (рис.8, 9) захватывают секции за оставшиеся лобовые части с другой стороны магнитопровода, вынимают их из пазов.

*Достоинства:* простота, не требует спецоборудования по сжиганию старой изоляции и расхода для этого энергии, не нарушается состояние изоляции между листами электротехнической стали в пакетах, нет коробления корпусов. *Недостатки:* требует больших механических усилий, в пазах много остатков старой трудноудаляемой изоляции, часты расслоения пакетов магнитопровода по краям, относительно малая производительность, невозможность восстановления обмоточного провода.

Метод, как правило, используется в мелких мастерских.

*Термомеханический метод* отличается от механического тем, что перед удалением секций из пазов проводят сжигание старой изоляции обмоток в специальных печах при температуре 280–350°С. Естественно, чем выше температура, тем быстрее разрушается изоляция, но и больше возможности коробления корпусов машин, особенно из алюминиевых сплавов.

Удаление старой обмотки может выполняться как со срезом одной лобовой части, так и без среза. Причем, если обмоточный про-

вод подлежит восстановлению, то, конечно, срез лобовой части не проводят. Удаление секций из пазов, после выбивки клиньев выполняется только вручную по одному проводнику (рис. 27).

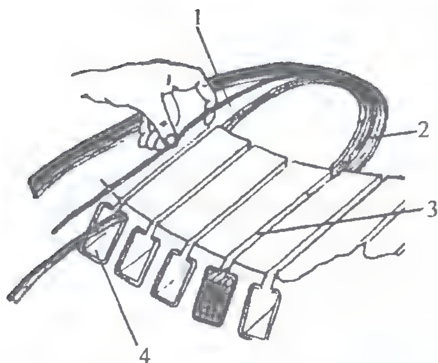


*Рис. 27.* Удаление проводников секции из паза через шлиц: *1* — проводник; *2* — секция; *3* — шлиц; *4* — паз

Конструкций обжиговых печей достаточно много. При этом равномерного теплового поля ни в одной из них пока не достигнуто, что требуется учитывать при загрузке. Практически в настоящее время все печи для поддержания требуемой температуры в нужных пределах и облегчения условий работы оснащены автоматикой. Тем не менее и сейчас нередки случаи возгорания в печах изоляции обмоток. При этом в данном месте резко возрастает температура со всеми вытекающими последствиями (пережоги электротехнической стали, коробление корпусов машин и пр.).

*Достоинства:* высокая производительность, незначительные механические усилия. После удаления обмоток в пазах остается мало старой изоляции, редки повреждения магнитопроводов при вытягивании секций, есть возможность восстановления обмоточного провода, имеет место нормальный отжиг листов электротехнической стали, что сокращает потери в магнитопроводе и повышает КПД электромашин. *Недостатки* (с уже указанными ранее): изоляция выгорает в пакетах между листами стали (по данным практики, после 2–3 обжигов прессовка магнитопровода нарушается, пакет нередко проворачивается в корпусе машины), при малейшем превышении допустимой температуры часты коробления алюминиевых корпусов. Метод имеет наибольшее распространение независимо от типа ремпредприятия.

Разновидностью термодинамического метода удаления старой обмотки является *электромагнитный способ,* при котором сжигание старой изоляции выполняется на заменяемом стержне однофазного трансформатора со съемным ярмом (рис. 28). Для сжига-

ния на основной стержень (*1*) магнитопровода трансформатора наматывается намагничивающая обмотка (*3*), желательно, с рядом дополнительных выводов (*2*), для ступенчатого изменения величины магнитного потока Ф в магнитной цепи.

Целесообразно, чтобы питание обмотки также осуществлялось от источника с регулируемым напряжением (*7*), это обеспечит более тонкую регулировку Ф.

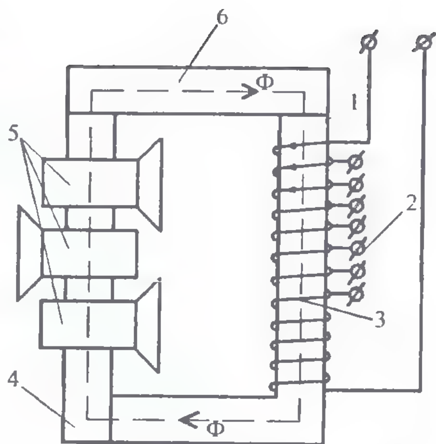



*Рис. 28.* Схема установки для сжигания изоляции обмоток машин электромагнитным методом

На заменяемый стержень (*4*) после удаления верхнего съемного ярма (*6*) надеваются магнитопроводы с корпусами электрических машин (*5*), изоляцию обмоток которых надо сжечь. Диаметры расточек статоров электромашин должны соответствовать диаметру стержня (*4*), так как рационально, чтобы зазор между ними не превышал 5 мм на сторону.

Принцип работы установки следующий: переменный магнитный поток Ф, создаваемый обмоткой, пронизывает листы пакетов магнитопроводов статоров (которые в данном случае являются короткозамкнутыми витками), индуктирует в них электродвижущие силы (ЭДС). Последние образуют в листах токи короткого замыкания и нагревают их.

*Достоинства:* несложное, экономичное и малогабаритное оборудование, простота регулировки температуры сжигания (ее можно устанавливать плавно — изменением напряжения источника питания, ступенчато — изменением числа витков намагничивающей обмотки), практически отсутствует коробление корпусов. *Недостатки:* необходимость в большом числе заменяемых стержней, малая производительность установки, пригоден лишь для электромашин малой мощности.

Используется в основном в малых мастерских.

*Химический метод* — разрушение старой изоляции обмоток производится специальными химически активными жидкостями типа МЖ-70 в специальных емкостях.

*Термохимический метод* — старая изоляция обрабатывается в камерах растворами каустической соды или щелочи, нагретых до температуры 80–100°С.

Обмотки удаляются из пазов по двум последним методам также, как у ранее рассмотренных.

*Достоинства:* отсутствие коробления корпусов, сохранение изоляции между листами стали в пакетах, возможность восстановления обмоточного провода. Недостаток — токсичность.

Методы могут быть рациональны при наличии дешевых реактивов, но требуют повышенного внимания по обеспечению безопасности работ.

# Глава 9. Восстановление обмоточного провода

Целесообразность восстановления обмоточного провода должна быть обоснована технико-экономическим расчетом. Следует иметь в виду, что качество восстановленного провода почти всегда ниже, чем нового, поэтому плотность тока при расчетах приходится брать меньше рекомендованных. Стоимость 1 м восстановленного провода, как правило, выше, чем нового. Однако в случаях крайней необходимости восстановление обмоточного провода проводится и выполняется по схеме:




Схема технологического процесса восстановления обмоточного провода

*Сортировка проводов* вначале проводится по материалу — алюминиевые отбраковываются, затем по длине для восстановления берутся только куски более 2-х м, по диаметру он не должен быть менее 0,8 мм.

Не подлежат также восстановлению обмоточные провода с серьезными механическими повреждениями.

*Удаление остатков старой изоляции проводов* начинается обжигом ее в печах, желательно, без доступа воздуха, при 250–600°С (в зависимости от диаметра). Продолжительность обработки зависит от многих причин (например, от класса нагревостойкости изоляции, диаметра проводника и т.д.), поэтому определяется экспериментально.

Для сжигания старой изоляции в практике ремонтных предприятий наиболее распространены печи с водяным затвором. Их особенность в том, что загрузка и выгрузка обмоточных проводов в рабочую зону выполняется через емкость с водой. Такая конструкция печей очень проста и обеспечивают тепловую обработку старой изоляции без воздействия кислорода воздуха.

В том случае, если доступа воздуха избежать не удается, на поверхности провода образуется черная пленка окисла меди. Она подлежит удалению путем травления в ванне с водным раствором серной кислоты плотностью 1,035–1,037 кг/м$^3$. Затем проводится промывка в проточной воде, дополнительно кислоту нейтрализуют в 1 % растворе мыла. Еще раз обязательно промывают в проточной воде и сушат в печах при температуре 70–100°С.

В заключение проводится *рихтовка,* под которой понимается придание проводу нужной формы. В данном случае выполняется выравнивание его по длине. Операция осуществляется на прави́льном станке.

Сварка катушек делается в стык на сварочном аппарате под слоем флюса. Место сварки зачищается и проволока, предварительно намотанная на катушку, подается на волочильный станок, где проводится его калибровка или волочение.

Калибровкой называют процесс протягивания провода через калибр — стальную пластину со стандартным отверстием, диаметр

которого равен диаметру провода. Калибровка не дает возможности удалить такие дефекты, как местные вмятины, глубокие царапины и т.п., для этого нужно волочение.

Волочение — это технологический процесс протягивания проволоки через калибр с меньшим диаметром (чем диаметр провода). Волочение дает почти полное удаление всех ее дефектов. При его выполнении для предотвращения обрывов проволоки следует сокращать сечение не более чем на 15–30 % за один проход.

*Восстановление структуры меди.* Калибровка и волочение вызывают в проводе структурные изменения, которые называют наклепом. Он связан с увеличением твердости меди и резким снижением относительного удлинения. Для того чтобы обмоточный провод вновь стал мягким, требуется термическая обработка — отжиг. Для этого его помещают в печь, нагревают до 400–500°С без доступа воздуха, выдерживают 30–50 мин, после чего опускают в воду и сушат. Если при отжиге изолировать провод от воздуха невозможно, после него проводится протравливание.

Нередко для получения требуемого меньшего сечения обмоточного провода процессы волочения, калибровки и восстановление структуры повторяют нужное число раз.

*Восстановление изоляции обмоточного провода.* Процесс его выполнения зависит от марки. Для наложения волокнистой изоляции на проволоку (например, ПБД, ПЭВШО и др.) используются оплеточные станки, для наложения эмали (например: ПЭЛ, ПЭВ и др.) — специальные установки. Конструкции таких станков и установок, как правило, разрабатываются каждым предприятием для своих конкретных условий.

В первом случае в оплеточных станках проволока с барабана проходит (рис. 29) вначале через рихтующее устройство, затем через центр вращающейся розетки, на которой закреплены катушки с пряжей в виде ленточек, из нескольких параллельных нитей, и через натяжное устройство сматывается на приемный барабан.

При этом очень важно обеспечить правильное согласование скорости перемещения проволоки (подачи) $V$ м/с и частоты вращения

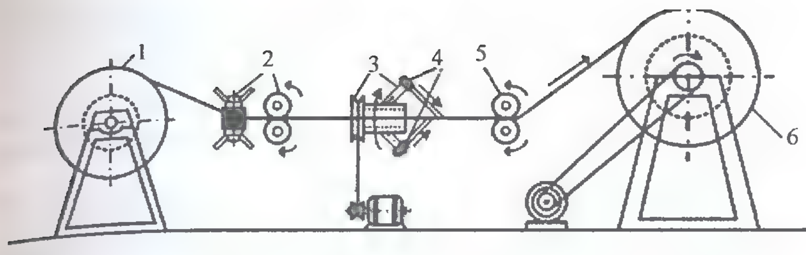



*Рис. 29.* Наложение на проволоку волокнистой изоляции: *1* — барабан с голой проволокой; *2* — рихтующее устройство; *3* — изолирующее устройство с электроприводом; *4* — ленточки из волокнистых материалов; *5* — натяжное устройство; *6* — приемный барабан с электроприводом

розеток $n$ мин$^{-1}$. Для согласования можно воспользоваться формулой определения шага намотки, $l$ мм/об.

$$l = 1000\frac{V}{n}.$$

Во втором случае на спецустановках вначале проволоку пропускают через ванну с эмалью, при выходе из нее для снятия излишков лака она проходит через калиброванное отверстие. Затем для удаления из эмали растворителя и получения твердой изоляционной пленки провод перемещается вдоль нагретой до необходимой температуры стенки печи. Требуемая толщина изоляции на обмоточном проводе получается путем повторения описанной операции нужное число раз. Естественно, что диаметр отверстий в последующих калибрах после каждого повторного погружения в эмаль увеличивается.

Обмоточный провод испытывают в соответствии с ГОСТом в следующем объеме: 1) измеряют сопротивление провода постоянному току (мостом или методом амперметра и вольтметра); 2) испытывают сопротивление на разрыв на разрывной машине; 3) определяют электрическую и механическую прочность изоляции (на сползание и изгиб).

Для проверки электрической прочности изоляции берут два отрезка обмоточного провода длиной 0,4 м и скручивают их, к свободным концам подводят испытательное напряжение, которое за-

висит от диаметра провода: при 0,8 мм и более — 600 В, при 2,83 мм и более — 900 В, время выдержки — 60 с. Если в этот период не происходит пробоя — изоляция испытание выдержала.

*Склад готового обмоточного провода.* Помещение для него должно быть чистым и сухим, желательно с постоянной температурой 18–20°С, не более 25°С.

Провода с малым сечением (до 1,68 мм) требуется намотать ровными рядами на деревянные катушки и обернуть бумагой, большего сечения хранят, как правило, в бухтах, завернутых мешковиной.

Каждая катушка, бухта должны иметь краткий паспорт: марка провода, масса, диаметр с изоляцией и без нее (в случае прямоугольного сечения указываются размеры его длины и ширины). По данным показателям все обмоточные провода группируются и затем размещаются на стеллажах.

# Глава 10. Расчет обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя при ремонте

Такой расчет, как правило, делают в том случае, если получить данные для выполнения новой обмотки по старой не представляется возможным или требуется проведение модернизации электромашины.

Работу в асинхронном двигателе (АД) выполняет вращающееся в расточке статора магнитное поле, следовательно, мощность асинхронного двигателя $P_{\text{АС.ДВ}}$ пропорциональна величине магнитного потока Ф, который создается магнитодвижущей силой $F$, равной произведению $I \cdot W$, а это значит, что величина Ф в магнитной цепи машины неизменна (Ф = const), отсюда можно написать:

$$P_{\text{АС.ДВ}} \equiv \Phi \equiv F = I \cdot W = \text{const},$$

$F$ — магнитодвижущая сила, Ампер-витки.

Также известно, что магнитная индукция $B$ (она же плотность магнитного потока, иначе нагрузка в магнитной цепи) равна, Тл:

$$B = \frac{\Phi}{Q}, \qquad (1)$$

$\Phi$ — магнитный поток, Вб; $Q$ — площадь сечения магнитопровода, м$^2$.

Основная цель при выполнении расчета обмотки — получение максимально возможной мощности от ремонтируемого АД, т.е. следует установить максимально возможную величину магнитного потока $\Phi$ для его магнитопровода. Но еще из курса физики известно, что электротехническая сталь обладает насыщением (рис. 30) и магнитную нагрузку в магнитной цепи нельзя увеличивать бесконечно.

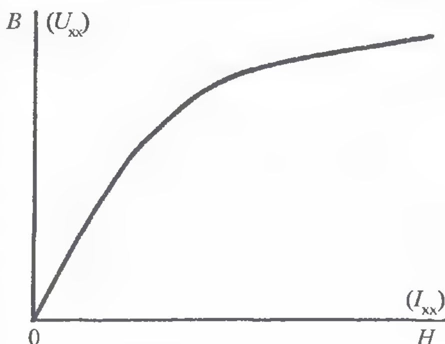


*Рис. 30.* Зависимость $B = f(H)$ электротехнической стали

Следовательно, мощность АД определяется размерами площадей его магнитопровода $Q$. Магнитопровод электромашины — та ее часть, которая набрана из штампованных пластин электротехнической стали в пакет.

Электротехническая сталь отличается от других марок меньшими потерями на вихревые токи. Это достигается, во-первых, легированием стали кремнием, оно увеличивает сопротивление ($R$) ее электрическому току. По закону Ома $I = E/R$, т.е. вихревые токи $I_в$ уменьшаются, а следовательно, сокращаются электропотери $\Delta P$, так как $\Delta P = I_в^2 \cdot R$; во-вторых, оптимальной толщиной листов стали, поскольку (по тому же закону) величина вихревых токов еще зависит от ЭДС ($E$). В листах $E = B \cdot l \cdot \vartheta$ (закон Фарадея), где $\vartheta$ — скорость перемещения проводника; $B$ — магнитная индукция; $l$ — длина проводника (в данном случае толщина листа стали $\delta$). Отсюда, чем тоньше пластины, тем меньше $E$, а значит и потери. Вот почему магнитопроводы электрических машин набираются из листов стали рациональной толщины, изолированных друг от друга.

Ф, протекающий по магнитопроводу, постоянен, но плотность его (т.е. магнитная индукция — $B$) на отдельных участках магнитной цепи меняется в связи с тем, что меняются в ней сечения магнитопровода. Это обусловливает в магнитопроводе асинхронного двигателя наличие следующих участков магнитной цепи: зубцовой зоны статора, его спинки, воздушного зазора, зубцовой зоны ротора, его спинки.

По конструктивному исполнению АД, площади в зубцовой зоне и спинке ротора больше, чем в соответствующих участках статора той же машины, отсюда магнитная индукция $B$ в них будет меньше (1). Поэтому в расчетах магнитных нагрузок зубцовой зоной и спинкой ротора пренебрегают и указанные нагрузки проверяют только по участкам зубцовой зоны и спинки статора, а также воздушному зазору.

Исходя из изложенного, расчет обмотки асинхронного двигателя начинают *с обмера магнитопровода* ремонтируемой машины для определения сечений участков его магнитной цепи, по которым будет протекать поток Ф. При этом замеряются следующие размеры (рис. 31), мм: $D$ — внутренний диаметр сердечника статора; $D_a$ — внешний диаметр сердечника статора; $l$ — полная длина сердечника статора; $\delta$ — толщина листов стали, мм; также устанавливается род изоляции между листами электротехнической стали; $z$ — число пазов (зубцов), шт.

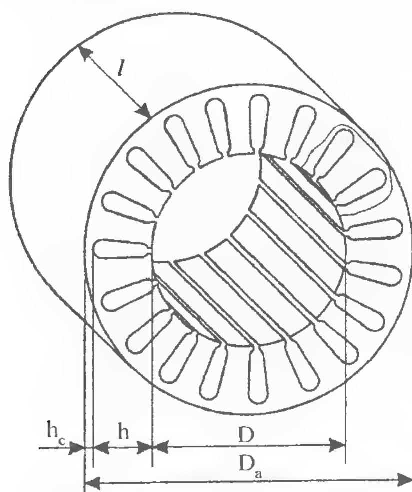


*Рис. 31.* Магнитопровод асинхронного двигателя

Для определения сечения обмоточного провода требуется знание площади паза. Причем профиль его может быть самой различной конфигурации (рис. 32). Но с помощью осевых линий любой из них легко делится на простые фигуры.

Причем каждый профиль паза для расчета площади требует осевых линий, снятия размеров и формул расчета (рис. 32).

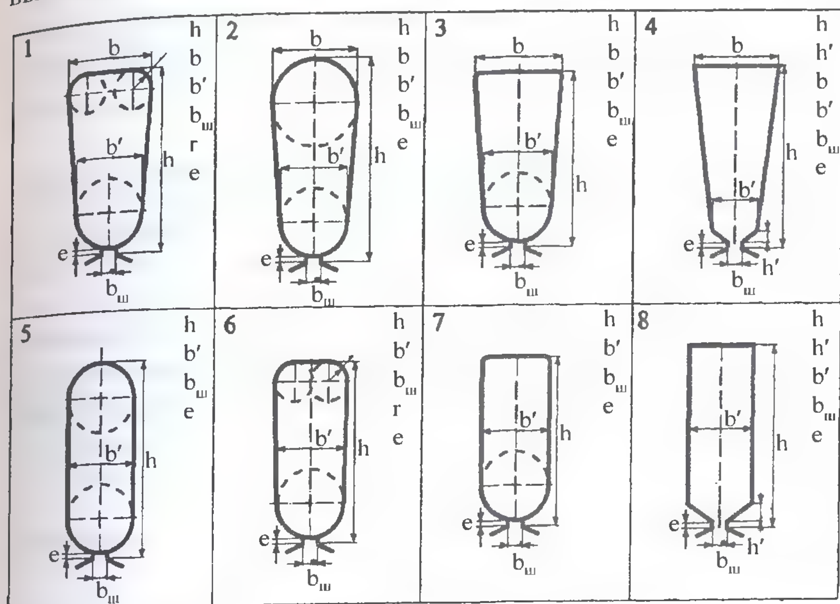



*Рис. 32.* Наиболее употребляемые профили пазов магнитопроводов асинхронных двигателей

На рис. 32: $b$ — большой размер ширины паза, мм; $b'$ — меньший размер ширины паза, мм; $b_ш$ — ширина шлица паза, мм; $h$ — полная высота паза, мм; $e$ — высота усика паза, мм; $r$ — радиус закругления углов, мм; $h'$ — высота трапеции. В профилях 5–8 — размеры $b = b'$.

Например, профиль паза 1 осевыми линиями разделяется на площади следующих фигур: полуокружности с диаметром $b'$, трапеции с основаниями $b$ и $b'$, прямоугольника с шириной $r$ и длиной $(b - 2 \cdot r)$, двух четвертей окружности с радиусом $r$.

Вместе с размерами магнитопровода асинхронного двигателя для расчета обмотки необходимо знание *технических условий потребителя (заказчика),* в которые входят частота вращения магнитного поля статора ($n$), мин$^{-1}$; фазное напряжение ($U_ф$) обмотки

статора, В; частота тока ($f$), Гц; схема соединения фазных обмоток (Y/Δ).

В целях упрощения дальнейших расчетов обмотки асинхронного двигателя целесообразно провести обработку полученных выше результатов измерений.

## 10.1. Подготовка данных обмера магнитопровода

Подготовка данных обмера магнитопровода включает расчеты площадей магнитной цепи асинхронного двигателя: полюса в воздушном зазоре ($Q_\delta$), в зубцовой зоне статора ($Q_z$), поперечного сечения спинки статора ($Q_c$), площади паза в свету ($Q_п$). Первые три площади необходимы для расчета магнитных нагрузок ($B$).

В воздушном зазоре сопротивление магнитному потоку по всей площади равномерное, поэтому, м$^2$:

$$Q_\delta = \tau \cdot l_P, \tag{2}$$

где $\tau$ — полюсное деление (ширина полюса в воздушном зазоре), м.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot P}, \tag{3}$$

где $P$ — количество пар полюсов, шт.

$$P = \frac{60 \cdot f}{n}, \tag{4}$$

$l_р$ — расчетная длина сердечника статора (без поперечных каналов для его охлаждения),

$$l_P = l - l_K \cdot n_K,$$

где $l$ — полная длина магнитопровода, м; $l_K$ и $n_K$ — ширина поперечных каналов (м) и их число; если каналов нет $l_P = l$.

В зубцовой зоне статора магнитный поток протекает только по листам электротехнической стали, так как ее магнитная проницаемость много больше, чем изоляции листов. Следовательно, длина магнитопровода $l$, а значит и площадь полюса $Q_z$, сократятся (на

площадь, занимаемую изоляцией). Отсюда $Q_z$ будет равна произведению *активной* площади зубца на их количество в полюсе, м²:

$$Q_Z = Q_{1Z} \cdot N_Z, \tag{5}$$

где $Q_{1Z}$ — площадь одного зубца, м²; $N_Z$ — количество зубцов под полюсом, шт.

$$Q_{1Z} = l_а \cdot b_Z, \tag{6}$$

где $l_а$ — активная длина магнитопровода (без изоляции листов), м, $b_z$ — расчетная средняя ширина зубца, м;

$$l_а = К_С \cdot l_Р, \tag{7}$$

где $К_С$ — коэффициент, учитывающий заполнение пакета магнитопровода сталью, зависящий от рода изоляции и толщины листов стали статора (δ). При δ равной 0,5 и 0,35 мм. $К_С$ для лака — 0,93 и 0,9, оксидной пленки — 0,95 и 0,93.

Средняя ширина зуба определяется из выражения, м:

$$b_Z = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot b_Z' + b_Z''), \tag{8}$$

где $b_Z'$ и $b_Z''$ — ширина зуба в узком и широком местах, м.

Нахождение узкого и широкого места у зуба зависит от размеров магнитопровода и формы паза, поэтому вначале находятся размеры зуба у расточки статора $b^{◊}$, а затем у его основания $b^{◊◊}$. Для профиля рис. 33:

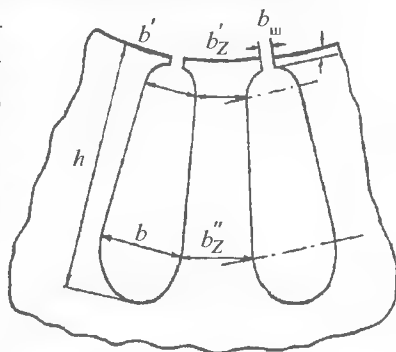



*Рис. 33.* Эскиз зубца магнитопровода асинхронного двигателя

ширина зуба у расточки, м:

$$b_Z^{◊} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot e + b')}{Z} - b'. \tag{9}$$

ширина зуба у основания, м:

$$b_Z^{◊◊} = \frac{\pi \cdot [(D + 2 \cdot h) - b]}{Z} - b. \tag{10}$$

По полученным значениям $b^{\Diamond}$ и $b^{\Diamond\Diamond}$ находятся ширина зубца в узком месте $b_Z'$ и в широком — $b_Z''$.

Количество зубцов под полюсом определяется из выражения, шт.:

$$N_Z = \frac{Z}{2 \cdot P}. \tag{11}$$

Площадь спинки статора, перпендикулярная магнитному потоку Ф, равна произведению ее высоты $h_C$ на активную длину магнитопровода $l_а$, м$^2$:

$$Q_C = h_C \cdot l_а, \tag{12}$$

$$h_C = \frac{D_a - (D + 2 \cdot h)}{2}. \tag{13}$$

Площадь паза в свету требуется при расчете сечения обмоточного провода.

В зависимости от профиля пазов магнитопроводов (рис. 32) после разбивки их площадей осевыми линиями на простые фигуры (по выше приведенному примеру) для определения указанных площадей можно воспользоваться следующими выражениями, мм$^2$:

*профиль 1:* $$Q_П = Q_{b'} + Q_Т + Q_{пр} + Q_r,$$

где $Q_{b'}$ — площадь полуокружности с диаметром $b'$, который равен меньшему размеру ширины паза, мм$^2$:

$$Q_{b'} = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8},$$

$Q_Т$ — площадь трапеции, мм$^2$; с основаниями $b$ и $b'$ и высотой $h_Т$, мм,

$$h_Т = h - e - \frac{b'}{2} - r,$$

тогда

$$Q_Т = \frac{b' + b}{2} \cdot h_Т.$$

$Q_{пр}$ — площадь прямоугольника, мм$^2$:

$$Q_{пр} = (b - 2 \cdot r) \cdot r,$$

$Q_r$ — площади четверти окружностей, закругления паза на углах с радиусами $r$, мм$^2$:

$$Q_r = \frac{\pi \cdot r^2}{4}.$$

Окончательно для профиля 1 формула площади паза в свету имеет вид, мм$^2$:

$$Q_П = \frac{\pi (b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \cdot h_T + (b - 2 \cdot r) \cdot r + 2 \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{4}.$$

Аналогично получены формулы площадей пазов для профилей всех остальных пазов (рис. 32) в мм$^2$. Профили от 2 до 8 имеют следующие виды выражений:

*профиль 2:* $$Q_П = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \cdot h_Т + \frac{\pi \cdot b^2}{8},$$

$h_Т$ — высота трапеции, мм$^2$:

$$h_Т = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2}.$$

*Профиль 3:* $$Q_П = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} \cdot h_Т,$$

$h_Т$ — высота трапеции, мм$^2$:

$$h_Т = h - e - \frac{b'}{2}.$$

*Профиль 4:* $$Q_П = \frac{(b_ш + b')}{2} h' + \frac{b' + b}{2} (h - e - h').$$

*Профиль 5:* $$Q_П = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8} + b' \left( h - e - 2 \cdot \frac{b'}{2} \right) + \frac{\pi \cdot (b')^2}{8}.$$

*Профиль 6:* $Q_П = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8} + b'\left(h - e - \frac{b'}{2} - r\right) + r \cdot (b' - 2r) + 2\frac{\pi \cdot r^2}{4}$

*Профиль 7:* $$Q_П = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8} + b'\left(h - e - \frac{b'}{2}\right).$$

*Профиль 8:* $$Q_П = \frac{(b_ш + b')}{2} \cdot h' + b'(h - e - h').$$

**Пример.** Определить площади магнитной цепи (рис. 31) и паза магнитопровода трехфазного асинхронного двигателя (рис. 32), профиль 2.*

Данные обмера магнитопровода и паза, мм:

$D$ = 110; $D_a$ = 191; $l$ = 125; $Z$ (шт.) = 24; $b$ = 12,6; $b'$ = 10,5; $b_ш$ = 3,5; $h$ = 15,1; $e$ = 0,5; $\delta$ = 0,35; род изоляции — лак.

Технические условия заказчика следующие: $n$ — 3000 мин$^{-1}$; $U_Ф$ — 220 *В*; $f^*$ — 50 Гц; схема соединения обмоток — Y/Δ.

**Решение**

**1.** Определяем площадь полюса в воздушном зазоре $Q_\delta$. Для этого находим:

1.1. количество пар полюсов (4):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \text{ шт.},$$

следовательно, количество полюсов будет: $2 \cdot P = 2 \cdot 1 = 2$ шт.;

1.2. полюсное деление (ширину полюса в воздушном зазоре) (3):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot P} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}11}{2} = 0{,}173 \text{ м.};$$

1.3. расчетную длину сердечника статора (так как поперечные каналы для охлаждения магнитопровода отсутствуют): $l_р = l = 0{,}125$ м;

* Здесь и далее в задании приводятся только необходимые для примера данные.

1.4. площадь полюса в воздушном зазоре (2):

$$Q_\delta = \tau \cdot l_p = 0{,}173 \cdot 0{,}125 = 0{,}0216 \text{ м}^2.$$

**2.** Определяем площадь полюса в зубцовой зоне $Q_Z$, для этого находим:

2.1. активную длину магнитопровода при δ 0,35 мм и лаковой изоляции между листами электротехнической стали $К_С = 0{,}9$, тогда (7):

$$l_a = К_С \cdot l_p = 0{,}9 \cdot 0{,}125 = 0{,}1125 \text{ м},$$

2.2. ширину зуба у расточки сердечника АД (9) (рис. 33):

$$b_Z^{\Diamond} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot e + b')}{Z} - b' =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (0{,}11 + 2 \cdot 0{,}0005 + 0{,}0105)}{24} - 0{,}0105 = 0{,}0054 \text{ м};$$

2.3. ширину зуба у основания сердечника АД (10):

$$b_Z^{\Diamond\Diamond} = \frac{\pi \cdot [(D + 2 \cdot h) - b]}{Z} - b =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot [(0{,}11 + 2 \cdot 0{,}0151) - 0{,}0126)]}{24} - 0{,}0126 = 0{,}0041 \text{ м},$$

2.4. среднюю ширину зуба. Из выполненных расчетов зуба следует, что узкое его место будет у основания, а широкое — у расточки магнитопровода АД. Отсюда $b_Z' = b_Z^{\Diamond\Diamond}$ и $b_Z'' = b_Z^{\Diamond}$. Тогда (8):

$$b_Z = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot b_Z' + b_Z'') = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 0{,}0041 + 0{,}0054) = 0{,}0045 \text{ м},$$

2.5. площадь одного зуба магнитопровода (6):

$$Q_{1z} = l_a \cdot b_z = 0{,}1125 \cdot 0{,}0045 = 0{,}00051 \text{ м}^2,$$

2.6. количество зубцов под одним полюсом:

$$N_Z = \frac{Z}{2 \cdot P} = \frac{24}{2 \cdot 1} = 12 \text{ шт.},$$

2.7. площадь полюса в зубцовой зоне (5):

$$Q_Z = Q_{1Z} \cdot N_Z = 0{,}00051 \cdot 12 = 0{,}0061 \text{ м}^2.$$

**3.** Определяем площадь магнитопровода в спинке статора $Q_С$, для этого находим:

3.1. высоту спинки статора (13) (рис. 31):

$$h_С = \frac{D_a - (D + 2 \cdot h)}{2} = \frac{0{,}191 - (0{,}11 + 2 \cdot 0{,}0151)}{2} = 0{,}0254 \text{ м},$$

3.2. площадь в спинке статора:

$$Q_С = h_С \cdot l_а = 0{,}0254 \cdot 0{,}1125 = 0{,}0029 \text{ м}^2.$$

**4.** Вычисляем площадь паза магнитопровода в свету $Q_П$ для профиля 2 (рис. 32). Для этого сложную форму паза разделяем осевыми линиями на простые фигуры (две полуокружности и трапеции), отсюда находим:

4.1. площадь полуокружности с диаметром $b'$:

$$Q_{b'} = \frac{\pi \cdot (b')^2}{8} = \frac{3{,}14 \cdot 10{,}5^2}{8} = 43{,}27 \text{ мм}^2,$$

4.2. высоту трапеции:

$$h_Т = h - e - \frac{b}{2} - \frac{b'}{2} = 15{,}1 - 0{,}5 - \frac{12{,}6}{2} - \frac{10{,}5}{2} = 3{,}05 \text{ мм},$$

4.3. площадь трапеции:

$$Q_Т = \frac{b' + b}{2} \cdot h_Т = \frac{12{,}6 + 10{,}5}{2} \cdot 3{,}05 = 35{,}22 \text{ мм}^2,$$

4.4. площадь полуокружности с диаметром $b$:

$$Q_{b'} = \frac{\pi \cdot b^2}{8} = \frac{3{,}14 \cdot 12{,}6^2}{8} = 62{,}3 \text{ мм}^2.$$

4.5. площадь паза в свету:

$$Q_П = Q_Т + Q_{b'} + Q_b = 43{,}27 + 35{,}22 + 62{,}3 = 140{,}79 \text{ мм}^2.$$

Для подытоживания расчетов площадей магнитной цепи полезно проанализировать результаты путем их сопоставления. Величина площади полюса в зубцовой зоне должна составлять около половины ее площади в воздушном зазоре. В случае, если частота вращения, заданная заказчиком, соответствует частоте вращения поля статора, на которую изначально рассчитан асинхронный двигатель, площадь полюса в зубцовой зоне резко не отличается от двойной ее величины в спинке статора.

## 10.2. Выбор типа обмотки

Выбор делается исходя из экономической целесообразности, минимального расхода обмоточного провода, номинальных мощности и напряжения, формы паза, достоинств и недостатков рассматриваемых обмоток, технической возможности выполнения обмотки.

Схемы статорных обмоток трехфазных электрических машин разделяют по:

- числу активных сторон секций в пазу на: *одно-* (у которых активная сторона одной и той же катушки занимает весь паз) и *двухслойные* (активная сторона занимает половину паза);
- размеру шага на: обмотки с *полным* шагом (при $y = y'$) и с *укороченным* шагом (при $y < y'$);
- частоте вращения магнитного поля статора на: *одно-* и *многоскоростные*;
- числу секций в катушечных группах (фазных катушек) на: обмотки с *одинаковым числом секций в группе* ($q$ равно целому числу) и *разным* ($q$ равно дробному числу).

По способу выполнения обмоток их еще разделяют на:

- *шаблонно-рассыпные* (или *всыпные*), они же называются и обмотками с *мягкими секциями*. У таких обмоток секции укладываются по одному проводнику через прорезь (шлиц) полузакрытого паза. Применяются для машин малой и средней мощности напряжением до 500 В;
- *протяжные*, выполняются протяжкой провода через пазы с торца. Используются для машин напряжением до 10 000 В при

закрытых или полузакрытых пазах. Способ укладки обмотки трудоемок. В настоящее время используется в основном при частичном ремонте обмоток;

- *обмотки с жесткими секциями*. Готовые, изолированные секции, несущие на активных частях пазовую изоляцию, укладываются в открытые пазы. Используются для машин средней и большой мощности с напряжением до 10 000 В (и более).

По способу размещения секций катушечных групп в расточке статора, а также размещения их лобовых частей обмотки подразделяются на:

- *концентрические*, с размещением секций (катушек) одна внутри другой и расположением лобовых частей в двух или трех плоскостях. Такие обмотки выполняются обычно вразвалку;
- *шаблонные*, с одинаковыми секциями катушечных групп. Они могут выполняться *простыми* и *вразвалку*. Если в шаблонной однослойной обмотке развалку выполнить не по полугруппам, а по отдельным катушкам, получим схему цепной обмотки.

*Однослойные обмотки* главным образом выполняются петлевыми, простыми шаблонными, шаблонными «вразвалку», цепными, концентрическими.

Основные *достоинства однослойной обмотки* по сравнению с двухслойной:

1. Отсутствие межслоевой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза, а следовательно, ток и мощность двигателя.

2. Простота изготовления.

3. Большая возможность применения автоматизации при укладке обмоток.

Основные *недостатки однослойной обмотки*:

1. Повышенный расход проводникового материала.

2. Сложность укорочения шага, а следовательно, компенсации высших гармоник магнитного потока.

3. Ограниченные возможности построения обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.

4. Более трудоемкое изготовление и монтаж катушек для крупных электродвигателей высокого напряжения.

*Двухслойные обмотки* в основном выполняются с одинаковыми секциями, петлевые, цепные, реже делаются концентрические.

Основные достоинства двухслойной обмотки по сравнению с однослойной:

1. Возможность любого укорочения шага, что позволяет:

а) снизить расход обмоточного провода за счет уменьшения длины лобовой части секций;

б) уменьшить высшие гармонические составляющие магнитного потока, т.е. снизить потери в магнитопроводе двигателя.

2. Простота технологического процесса изготовления катушек (многие операции можно механизировать).

3. Возможность выполнения обмотки почти с любой дробностью $q$, что обеспечивает изготовление обмотки при ремонте асинхронных двигателей с изменением частоты вращения ротора. Кроме того, это является одним из способов приближения формы поля к синусоиде.

4. Возможность образования большего числа параллельных ветвей.

Основные *недостатки двухслойной обмотки*:

1. Меньший коэффициент заполнения паза (вследствие наличия межслоевой изоляции).

2. Некоторая сложность при укладке последних секций обмотки.

3. Необходимость поднимать целый шаг обмотки при повреждении нижней стороны секции.

В настоящее время в ремонтной практике машин переменного тока наиболее распространены двухслойные обмотки. Они дают возможность (особенно при укороченном шаге) сократить до минимума, по сравнению с другими типами обмоток, расход обмоточного провода на единицу мощности АД. Обладают такими существенными достоинствами, как простота технологии изготовления, высокая степень компенсации гармонических составляющих магнитного потока и пр. К сказанному следует добавить, что *двухслойные обмотки без укорочения шага практически не делаются*.

## 10.3. Расчет обмоточных данных

Полная обмотка асинхронного двигателя, размещенная в магнитопроводе его статора, состоит из 3-х самостоятельных *фазных обмоток* (А, В и $C$), каждая из которых имеет свои выводы, соответственно, $C_1$–$C_4$; $C_2$–$C_5$; $C_3$–$C_6$, из них $C_1$, $C_2$, $C_3$ — начало, $C_4$, $C_5$, $C_6$ — концы.

Каждая фазная обмотка состоит из *фазных катушек*, или иначе *катушечных групп*, соединенных последовательно, параллельно или комбинированно. Катушечную группу нередко называют еще *полюсной группой.*

*Катушкой* называются витки, имеющие общую ось.

Под катушечной группой понимается ряд последовательно соединенных между собой секций, принадлежащих одной фазе в одной паре полюсов.

*Секция* является частью катушечной группы и представляет собой катушку из обмоточного провода, число витков которой определяется специальным расчетом, минимальное число равно одному витку. Каждый виток (а следовательно, секция) состоит из *двух активных* проводников (сторон), уложенных в пазы магнитопровода статора двигателя, и *двух лобовых* частей, соединяющих эти активные проводники. Активными они являются потому, что именно в них магнитный поток машины Ф индуктирует ЭДС (в отличие от лобовых).

*Полюсом* в общем случае называют сечение ферромагнитного материала, через которое магнитный поток переходит из одной среды в другую, например, из сердечника электромашины в воздух.

В расточке статора асинхронного двигателя полюсом принято называть часть магнитопровода, охватывающую рядом расположенные пазы, в которых активные проводники обмотки имеют одно и то же направление тока.

В создании полюса участвуют все три фазы тока, следовательно, в каждом должны быть их фазные катушки.

Любой тип обмотки трехфазной машины переменного тока характеризуется следующими обмоточными данными: $N$ — число катушечных групп; $y$ — шаг обмотки; $q$ — число пазов на полюс и фазу (равно числу секций в катушечной группе); $\alpha$ — число электрических градусов, приходящихся на один паз; $a$ — число параллельных ветвей.

***Число катушечных групп (N).*** Поскольку в витке ток в активных проводниках направлен встречно, каждая фазная катушка обмотки участвует в создании пары полюсов. Следовательно, между числом катушечных групп и числом пар полюсов имеется жесткая связь и для однослойной обмотки:

$$N_{1\Phi}^{(1)} = P, \tag{14}$$

где $N_{1\Phi}^{(1)}$ — число катушечных групп в одной фазе однослойной обмотки, шт.

А так как каждую пару полюсов создают все три фазы переменного тока, следовательно, число катушечных групп обмотки асинхронного двигателя естественно увеличивается в $m$ (3) раз:

$$N_{3\Phi}^{(1)} = P \cdot m. \tag{15}$$

В двухслойных обмотках число катушечных групп механически увеличивается в два раза (фазные катушки однослойной обмотки по всем секциям разделяют пополам), поэтому в каждой секции число витков будет в два раза меньше, число же катушечных групп в два раза больше, следовательно, шт.:

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2P, \tag{16}$$

где $N_{1\Phi}^{(2)}$ — число катушечных групп в одной фазе двухслойной обмотки. На три фазы:

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2P \cdot m. \tag{17}$$

***Шаг обмотки (y).*** Ток, протекающий по виткам катушки, внутрь которой вставлен ферромагнитный стержень, создает в нем магнитный поток. В магнитопроводе АД секции (катушки) уложены в пазы, охватывающие стальные зубцы, поэтому текущий в них ток в воздушном зазоре создает полюс. Следовательно, активные стороны секций смещены в расточке статора на расстояние полюса. Отсюда шаг обмотки ($y$) — расстояние, выраженное в зубцах (или пазах), между активными сторонами одной и той же секции, он определяется по формуле

$$y' = \frac{Z}{2P} \pm \varepsilon, \tag{18}$$

где $y'$ — расчетный шаг (равен полюсному делению, выраженному в зубцах); ε — произвольное число меньше 1, доводит расчетный шаг ($y'$) до целого значения.

Если между активными сторонами секции помещается полюс, такой шаг ($y$) называется *полным или диаметральным*, если же меньше размера полюсного деления ($y < y'$), — *укороченным*.

На практике принято шаг определять в пазах, поэтому при раскладке вторая сторона секции ложиться в паз $y + 1$.

***Число пазов на полюс и фазу (q).*** Находится для того, чтобы определить число секций в катушечной группе. Действительно, если в полюсе на одну фазу приходится более одного паза, витки фазной сосредоточенной катушки разделяют на количество секций, равное, шт.:

$$q = \frac{Z}{2P \cdot m}, \tag{19}$$

$m$ — число фаз. При $q = 1$ в полюсе статора на одну фазу приходится только один паз, значит катушка этой фазы не может быть разделена на секции. Такая обмотка называется *сосредоточенной.*

При $q > 1$ обмотка называется *рассредоточенной*, при этом фазные катушки должны быть разделены на секции, число которых равно $q$. При $q = 2$ катушечная группа будет состоять из двух секций, при $q = 3$ — из трех и т.д. Суммарное число витков этих секций равно числу витков сосредоточенной фазной катушки.

***Число электрических градусов на один паз (α).*** В расточке статора асинхронного двигателя распределение магнитного потока под одной парой полюсов подчиняется синусоидальному закону, т.е. по краям полюсов магнитных силовых линий нет, при приближении к центру число их плавно возрастает и в центре полюса достигает максимума. Это показывает изменение ЭДС ($e$) в проводнике, если его провести (или сделать один оборот ротора) под одной парой полюсов.

Известно, что $e = B \cdot l \cdot v$, где $B$ — магнитная индукция, $l$ — длина проводника, $v$ — скорость его движения. Отсюда, при постоянных $l$ и $v$ *изменение величины e зависит только от изменения величины B* (рис. 34, *а*).

Тогда при перемещении проводника под одной парой полюсов в нем происходит *полный цикл* изменения величины *e*, следовательно, также меняется и магнитный поток (и индукция — *B*). Синусоида делится на 360 градусов, т.е. на одну пару полюсов приходится 360 электрических градусов (эл.гр.).

При движении проводника под двумя парами полюсов (за один оборот) (рис. 34, *б*) ЭДС в нем изменится два раза по 360 эл. гр. (360 · 2 = 720 эл.гр.), т.е. в общем случае в любой машине число электрических градусов в расточке статора можно определить по формуле

$$360 \cdot P\,.$$

Если в магнитопроводе число пазов равно *Z*, то число электрических градусов, приходящихся на один паз, или угловой сдвиг между рядом лежащими пазами α равен:

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z}\,. \qquad (20)$$

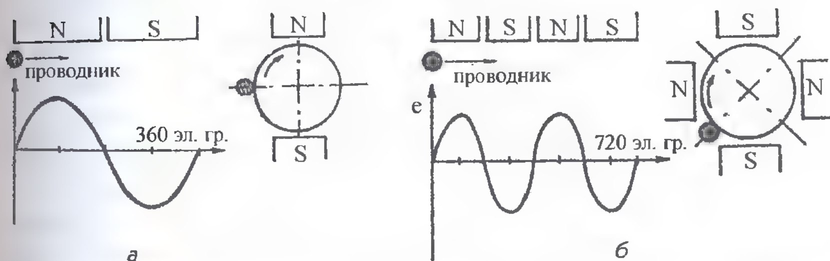
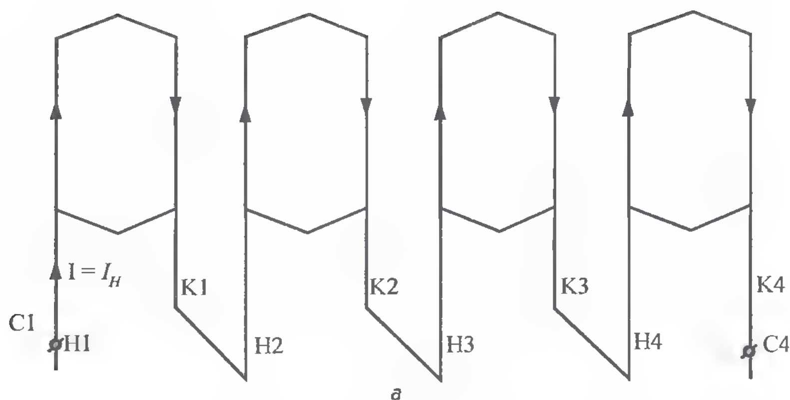
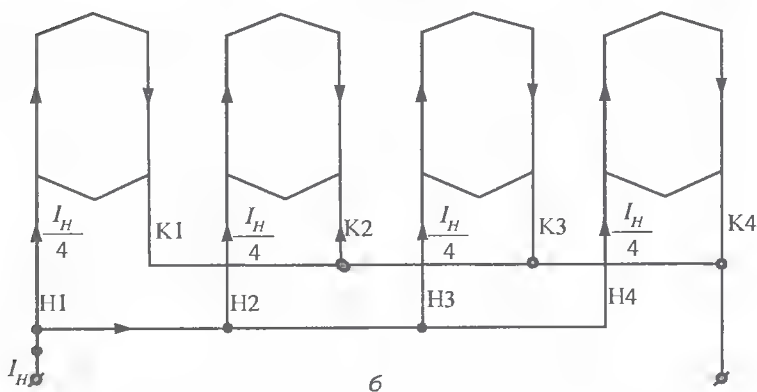



*Рис. 34.* Зависимость числа электрических градусов в расточке статора электромашины от одной (*а*) или двух (*б*) пар полюсов

***Число параллельных ветвей (а).*** Параллельные ветви в обмотке асинхронного двигателя делаются для сокращения сечения обмоточного провода, кроме того, в определенной мере, это дает возможность лучше загрузить магнитную систему машины.

Все катушечные группы обмотки одной фазы могут быть соединены последовательно, как это показано на рис. 35, *а*. В этом случае *число параллельных ветвей равно* 1 (*а* = 1), буквами Н, К и цифрами обозначены соответственно начала и концы фазных катушек.



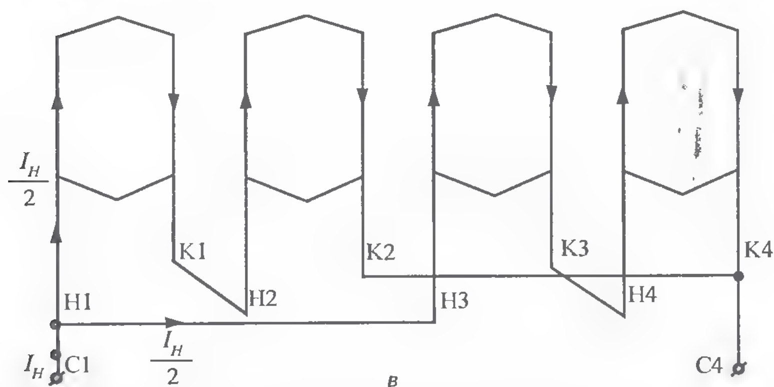




*Рис. 35.* Катушечные группы обмотки одной фазы, включенные в одну (*а*), четыре (*б*), две (*в*) параллельные ветви

При параллельном включении катушечных групп число параллельных ветвей равняется числу фазных катушек в обмотке одной фазы $N_{1Ф}$ (рис. 35, *б*, $a = 4$).

Можно катушечные группы обмотки одной фазы соединять и комбинированно (часть последовательно и часть параллельно), как показано на рис. 35, *в*, $a = 2$, но при этом в любом случае число катушечных групп в каждой параллельной ветви должно быть строго одинаковым.

Решение о рациональном числе параллельных ветвей принимается только после разделения обмоточного провода на *параллельные сечения*.

Рассчитанные обмоточные данные используются по приведенным ниже методикам, в частности, для построения однослойных и двухслойных петлевых обмоток. Отличия в исполнении других обмоток незначительны.

## 10.4. Принципы построения схем статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя

Для получения вращающегося магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя при любой схеме обмотки требуется:

1) смещение в пространстве расточки статора АД фазных обмоток одна относительно другой на 120 эл. гр.;

2) смещение во времени токов, протекающих по этим обмоткам, на одну треть периода *(следовательно, векторы, изображающие указанные токи на плоскости, будут сдвинуты на 120 эл. гр.)*.

Первое условие выполняется соответствующей укладкой катушечных групп трехфазной обмотки, второе — подключением асинхронных двигателей к сети трехфазного тока, в которой временной сдвиг между напряжениями трех фаз обеспечивается генераторами электрических станций. Эти напряжения в замкнутых цепях обмоток машин создают нужный сдвиг токов.

**Построение однослойной обмотки.** Пусть статор имеет количество пазов магнитопровода $Z = 24$. Технические требования заказчика: частота вращения поля ($n$) — 1500 мин$^{-1}$, частота тока ($f$) — 50 Гц.

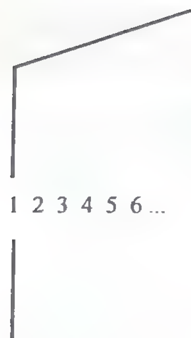



*Рис. 36.* Размещение первой активной стороны секции в магнитопроводе

При построении схемы обмотка первой фазы может в общем начинаться с любого паза. В нашем случае первую активную сторону секции помещаем в первый паз (рис. 36).

Определяем число пар полюсов по формуле (4)

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

а) Находим шаг обмотки (секции) по формуле (18)

$$y' = \frac{Z}{2P} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

Следовательно, при $y = y'$ вторую активную сторону секции помещаем через шесть зубцов в седьмой паз (рис. 37 ), $y + 1 = 6 + 1$.

б) Определяем число пазов на полюс и фазу по формуле (19)

$$q = \frac{Z}{2P \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2\,.$$

Отсюда одна катушечная группа имеет две секции, тогда вторая секция занимает соответственно пазы 2 и 8 (рис. 38).

в) Число катушечных групп в однослойной обмотке одной фазы определим по формуле (14)

$$N_{1\Phi}^{(1)} = P = 2\,.$$

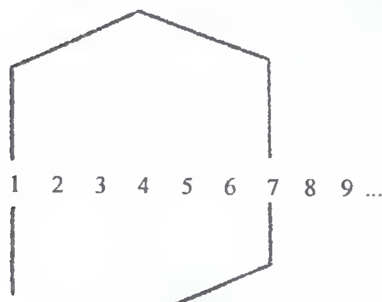



*Рис. 37.* Размещение второй активной стороны секции в магнитопроводе

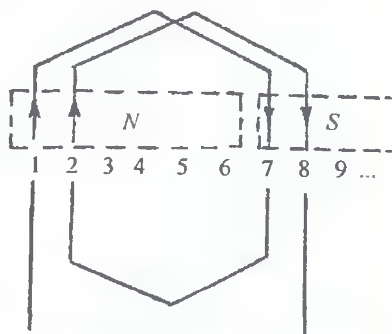



*Рис. 38.* Размещение в магнитопроводе первой катушечной группы обмотки

г) В какие пазы укладывается вторая катушечная группа той же самой фазы ( $N_{1Ф}^{(1)} = 2$ )?

В однослойной обмотке первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов (рис. 38 ), вторая должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, т.е. 360 эл.гр. Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах будет:

$$\text{A} \rightarrow \frac{360}{\alpha},$$

где $\alpha$ — число эл. гр. на один паз. Рассчитывается по формуле (20).

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{Z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30 \text{ эл.гр.},$$

тогда

$$\text{A} \rightarrow \frac{360}{\alpha} = \frac{360}{30} = 12 \text{ пазов.}$$

Отсюда вторая катушечная группа фазы «А» начинается с 13 паза (рис. 39).

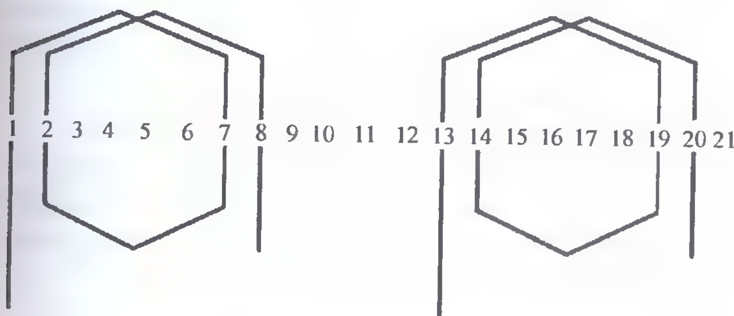



*Рис. 39.* Размещение катушечных групп обмотки одной фазы

д) Как соединить между собой уложенные катушечные группы?

Чтобы ответить на этот вопрос, вначале необходимо принять число параллельных ветвей ($a$), которое далее уточняется после расчета сечения обмоточного провода ($П_р$). В предварительном расче-

те число параллельных ветвей можно брать произвольно, их максимальное количество, как указывалось, допустимо брать равным числу катушечных групп в одной фазе ( $N_{1Ф}^{(1)}$ ).

Однако пока неизвестно ($П_р$), рационально ли принимать $a = 1$. Затем необходимо показать направления токов в активных проводниках катушек исходя из закона чередования полюсов.

Если в машине 4 полюса (рис. 40), то *по направлению тока их можно соединить* только следующим образом: конец первой катушечной группы — с началом второй, что является законом для однослойных обмоток.

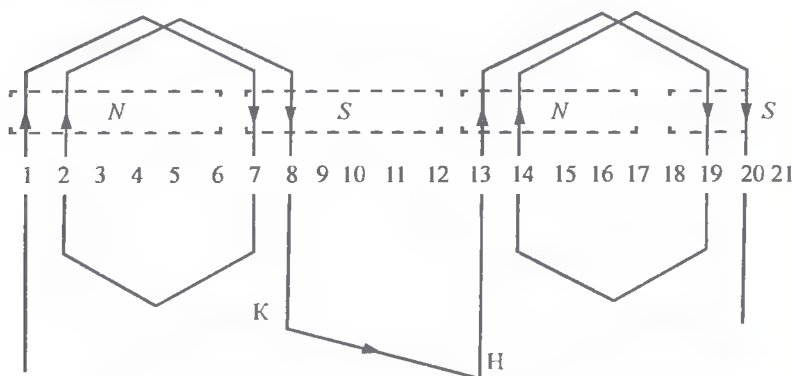



*Рис. 40.* Направление токов в активных сторонах секций уложенных катушечных групп обмотки одной фазы и их соединение

Обмотки фаз В и С выполняются аналогично, но согласно условию получения вращающегося магнитного поля в расточке статора, они сдвинуты соответственно на 120 и 240 эл.гр. относительно обмотки фазы А, т.е. в пазах это будет:

$$B \to \frac{120}{\alpha} = \frac{120}{30} = 4, \qquad C \to \frac{240}{\alpha} = \frac{240}{30} = 8.$$

Следовательно, обмотки фаз В и С начинаются соответственно в 5-м и 9-м пазах. Укладка их катушечных групп аналогична обмотке фазы А. В результате получаем обмотку асинхронного двигателя (рис. 41).

е) Как определить полюса в расточке статора?

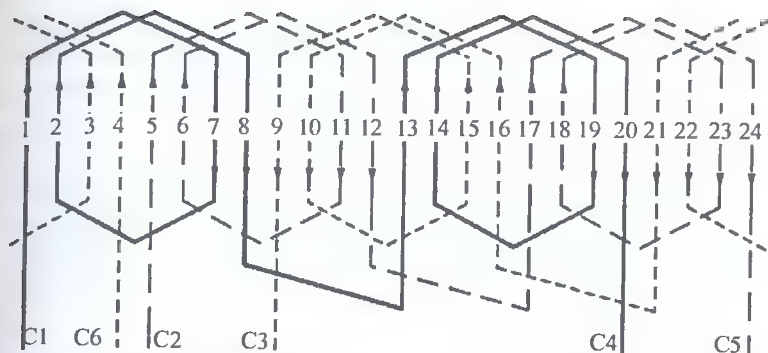
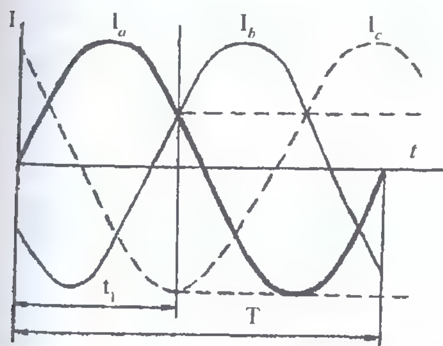
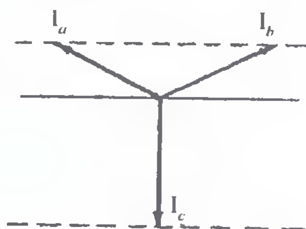



*Рис. 41.* Развернутая схема однослойной статорной обмотки при $N_{3Ф}^{(1)} = 6$; $y = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30^0$; а = 1

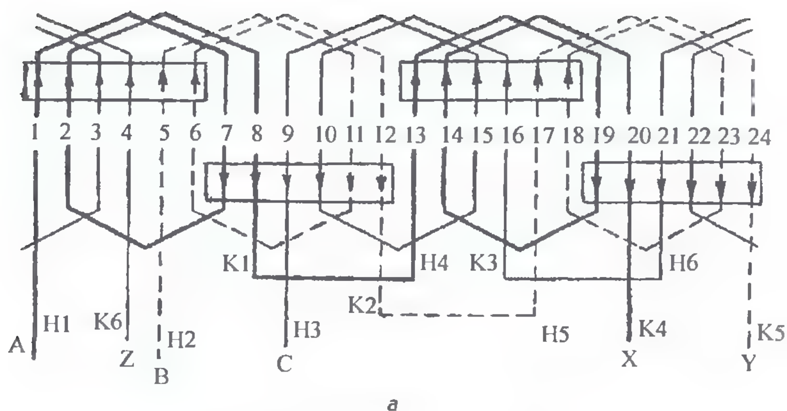
Направления токов — в активных проводниках обмоток, а значит и положение полюсов в расточке статора могут быть показаны только *для данного момента t*. Оно берется произвольно. Принятому $t_1$ на развертке $I = f(t)$ (рис. 42, *а*) соответствует векторная диаграмма токов (рис. 42, *б*). Из последней следует, что в момент $t_1$ токи в обмотках фаз А и В текут в одном направлении, а в обмотке фазы С — в противоположном, причем сумма первых ($I_a + I_b$) равна $I_c$ (закон Кирхгофа).



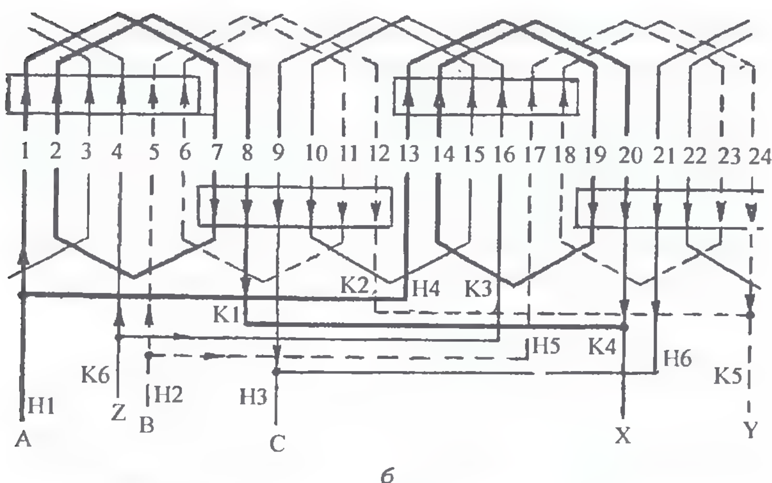




*а* *б*

*Рис. 42.* Развертка зависимости токов от времени (*а*) $I = f(t)$ и векторная диаграмма токов (*б*) для $t_1$




*а*




*б*

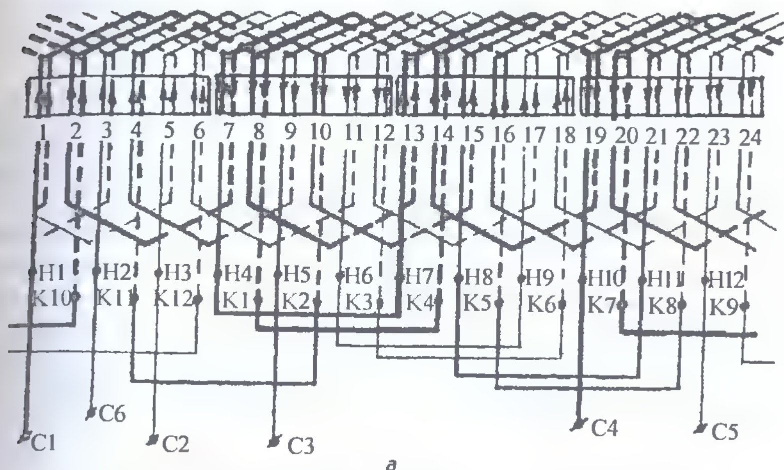
*Рис. 43.* Развернутая схема однослойной статорной обмотки с положением полюсов, соответствующих времени $t_1$ при $a = 1$ (*а*) и 2 (*б*); $N_{3Ф}^{(1)} = 6$; $y = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30°$

Расстановка токов в активных проводниках по пазам расточки статора в соответствии с векторной диаграммой (рис. 43, *а*) и (рис. 43, *б*) дает возможность найти положение полюсов для принятого времени $t_1$.

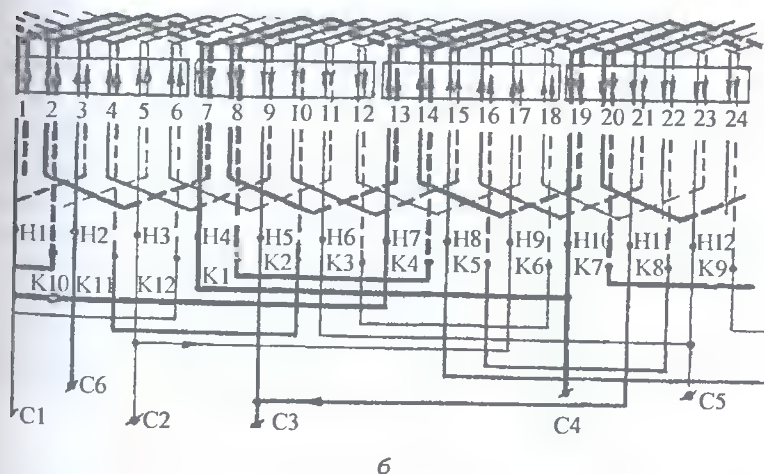
### Построение двухслойной обмотки.

В отличие от однослойных в двухслойных обмотках катушечных групп в два раза больше (16):

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2P = 4 .$$




*а*




*б*

*Рис. 44.* Развернутая схема двухслойной статорной обмотки при $N_{3\Phi}^{(2)} = 12$; $y = 6$; $q = 2$; $\alpha = 30°$; $a = 1$ (*а*) и 2 (*б*)

Кроме того, у одной и той же фазы они сдвигаются не на 360 эл. гр. (как в однослойных обмотках), а на 180(!). Соединяются они между собой – конец предыдущей катушечной группы с концом последующей, а начало — с началом (этого требует направление токов) (рис. 44, *а*, *б*). Отсюда общее число катушечных групп в обмотке равно (17):

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2P \cdot m = 12 \cdot$$

Все остальные обмоточные данные находятся по тем же выражениям, как и для однослойных обмоток: шаг обмотки (18) $y = 6$, число пазов на полюс и фазу (19) $q = 2$, число эл. гр., приходящихся на один паз (20) $\alpha = 30$ эл. гр., число параллельных ветвей $a = 1$.

Построение двухслойной обмотки (рис. 44, *а*, *б*) принципиально ничем не отличается от однослойной и выполняется по следующим этапам: укладываются секции катушечных групп всех трех фаз; проводится соединение этих групп в обмотки с требуемым числом параллельных ветвей; для принятого $t_1$ (рис. 42) показываются направления фазных токов в расточке статора, находится положение полюсов.

## 10.5. Расчет числа витков в обмотке одной фазы и в одной секции

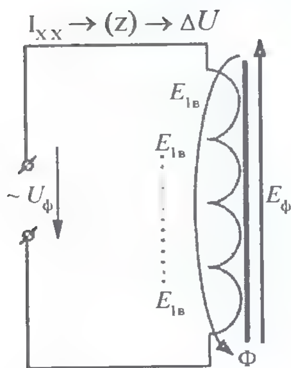



*Рис. 45.* Принципиальная схема работы асинхронного двигателя

При подаче напряжения $U_Ф$ на обмотку по ней потечет ток холостого хода $I_{х.х}$ (рис. 45). Так как напряжение изменяется по синусоидальному закону, ток тоже будет переменным. Он создаст в магнитной системе машины магнитный поток Ф, который также будет переменным. Поток Ф индуктирует в витках обмотки, которая его создала, ЭДС ($E_Ф$), направленную встречно приложенному напряжению (закон электромагнитной индукции).

ЭДС фазной обмотки $E_Ф$ будет слагаться из суммы ЭДС отдельных витков $E_{1В}$, В:

$$E_\Phi = \sum E_{1B} \quad \text{или} \quad E_\Phi = E_{1B} \cdot W_\Phi, \tag{21}$$

где $W_\Phi$ — количество витков в обмотке одной фазы, шт. Кроме того, ток $I_{x.x}$ создает на активном и реактивном сопротивлениях обмотки $r$ и $x$ падение напряжения $\Delta U = I \cdot r_1 + I \cdot x_1$. Таким образом, приложенное к обмотке напряжение $U_\Phi$ уравновешивается ЭДС $E_\Phi$ и падением напряжения в обмотке $\Delta U$.

Математически в векторной форме все сказанное приведено на упрощенной векторной диаграмме асинхронного двигателя (рис. 46). Для наглядности рядом показана фактическая векторная диаграмма электромашины, при этом $U_\Phi = U_1$, а $E_\Phi = E_1$.

Из изложенного (21) и векторной диаграммы следует:

$$W_\Phi = \frac{E_\Phi}{E_{1B}}, \tag{22}$$

где $E_{1B}$ — ЭДС одного витка обмотки, В.

Падение напряжения $\Delta U$ в обмотке АД приблизительно составляет 2,5–4,0 % от $U_\Phi$ (в среднем около 3 %). Отсюда без ущерба для точности расчета можно записать:

$$E_\phi = 0{,}97 \cdot U_\phi, \tag{23}$$

где $E_\Phi$ — ЭДС обмотки фазы, В; $U_\Phi$ — фазное напряжение, В.

Учитывая выражение (23), уравнение (22) примет вид

$$W_\Phi = \frac{0{,}97 \cdot U_\Phi}{E_{1B}}. \tag{24}$$

Мгновенное значение ЭДС одного витка, как известно из теоретической электротехники, определяется из выражения

$$e_{1B} = -\frac{d\Phi}{dt}, \tag{25}$$

$t$ — время, с.

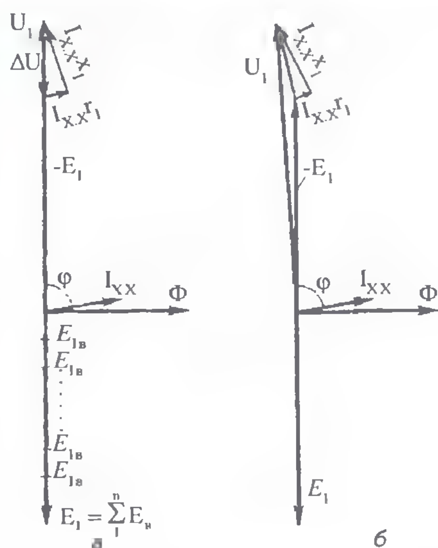



Рис. 46. Векторные диаграммы асинхронного двигателя: упрощенная (а); фактическая (б)

Магнитный поток изменяется по закону

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t , \tag{26}$$

где $\Phi_m$ — амплитудное значение магнитного потока, Вб, $\omega$ — угловая частота вращения поля.

Подставив уравнение (26) в (25) и взяв производную, получим:

$$e_{1\Phi} = -\omega \cdot \Phi_m \cdot \cos\omega t = \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin (\omega t - \pi / 2) .$$

Максимальное значение ЭДС одного витка будет при:

$$\sin (\omega t - \pi / 2) = 1 ,$$

тогда (так как $\omega = 2\pi \cdot f$):

$$E_{1Bm} = \omega \cdot \Phi_m = 2\pi \cdot f \cdot \Phi_m .$$

Действующее значение отличается от максимального на $\sqrt{2}$, значит

$$E_{1B} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \Phi_m .$$

У асинхронного двигателя обмотка редко бывает сосредоточенной, чаще всего $q > 1$. При этом часть магнитного потока Ф рассеивается, что учитывается *коэффициентом распределения* $К_р$:

$$К_р = \frac{\sin (\alpha \cdot q / 2)}{q \cdot \sin (\alpha / 2)} . \tag{27}$$

Практически все двухслойные обмотки выполняются только с укороченным шагом. Это приводит к тому, что на границах полюсов в секциях разных фаз, лежащих в одном пазу, направление токов будет встречное. Следовательно, суммарный магнитный поток от этих секций будет равен нулю, что уменьшает общий магнитный поток Ф. Это явление учитывается коэффициентом укорочения $К_у$.

*Для получения наиболее рационального* $К_у$, *при котором обеспечивается подавление высших гармоник магнитного потока, наиболее искажающих форму кривой его изменения, рекомендуется* коэффициент укорочения шага *брать равным* 0,8. Отсюда шаг $y = 0{,}8 \cdot y'$. Следовательно, $К_у$ можно определить из выражения

$$К_У = \sin \cdot \left( 90 \cdot \frac{y}{y'} \right). \quad (28)$$

Для удобства расчетов пользуются произведением этих коэффициентов, которое называется *обмоточным коэффициентом* $К_{ОБ}$:

$$К_{ОБ} = К_р \cdot К_у. \quad (29)$$

Тогда окончательно ЭДС одного витка равна

$$E_{1В} = 4{,}44 \cdot f \cdot Ф \cdot К_{ОБ}. \quad (30)$$

Подставляя выражения (30) и (23) в (22), получим:

$$W_Ф = \frac{0{,}97 \cdot U_Ф}{4{,}44 \cdot f \cdot Ф \cdot К_{ОБ}}. \quad (31)$$

В выражении (31) $U_Ф$ и $f$ заданы заказчиком, следовательно, для расчета $W_Ф$ требуется знать лишь магнитный поток Ф. Последний под полюсом распределяется неравномерно (рис. 47). Однако при равенстве площадей прямоугольника со стороной $B_{СР}$ и полусинусоиды с максимальным значением $B_\delta$ величина магнитного поля Ф под полюсом будет одинаковой. Значит

$$B_{СР} = \frac{B_\delta}{\pi/2} = 2/\pi \cdot B_\delta, \quad (32)$$

где $2/\pi$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока под полюсом; $B_{ср}$ — среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; $B_\delta$ — максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл (табл. 10.1).

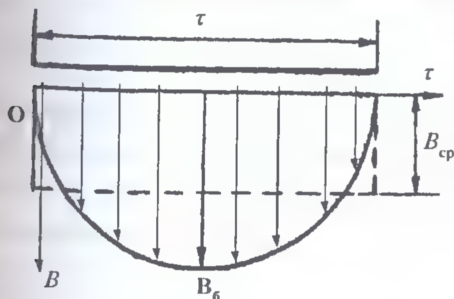



*Рис. 47.* Распределение *B* под полюсом в воздушном зазоре

*Таблица 10.1.* **Нормированные электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей**

| Наименование | Мощность, кВт | | |
|---|---|---|---|
| | до 1 | 1–10 | 10–100 |
| Индукция в воздушном зазоре ($B_\delta$), Тл | 0,3–0,6 | 0,6–0,7 | 0,7–0,9 |
| Индукция в зубцах статора ($B_Z$), Тл | 1,3–1,5 | 1,4–1,6 | 1,4–1,8 |
| Индукция в спинке статора ($B_C$), Тл | 1,1–1,5 | 1,2–1,6 | 1,3–1,6 |
| Плотность тока в обмотке статора ($j$), А/мм | | *однослойная* | |
| | 5,5–6,5 | 4,5–5 | 3,5–3,8 |
| | | *двухслойная* | |
| | 6–8 | 5,5–6 | 4–4,5 |
| Допустимая линейная нагрузка ($A_{доп}$), А/м·$10^3$ | | *однослойная* | |
| | 10,0–14,0 | 18,0–22,5 | 24,0–30,0 |
| | | *двухслойная* | |
| | 15,0–20,0 | 25,0–30,0 | 32,5–40,0 |

1. Однослойные обмотки, как правило, не дают возможности укорачивать шаг для подавления высших гармоник — Ф. Это ведет к дополнительному нагреву стали магнитопровода (по сравнению с двигателями, у которых двухслойная обмотка имеет укороченный шаг). Исходя из сказанного для электрической машины с однослойной обмоткой магнитные индукции на всех участках магнитной цепи берутся ближе к нижнему пределу, для двухслойных — к большому.

2. Если асинхронный двигатель работает в помещениях с постоянно повышенной температурой, следует брать магнитные индукции ($B_\delta$, $B_Z$, $B_C$) ближе к нижнему пределу.

3. При всех равных условиях от магнитопровода электромашины требуется получить максимальную мощность, которую она может дать (т.е. наиболее допустимый магнитный поток).

Отсюда величина магнитного потока ($B_\delta$) находится по формуле

$$\Phi = 2 / \pi \cdot B_\delta \cdot Q_\delta, \qquad (33)$$

где $Q_\delta$ — площадь полюса в воздушном зазоре, м$^2$.

*Расчет оптимального числа витков в обмотке одной фазы. Цель* — определение рационального числа витков в равносекционной обмотке одной фазы асинхронного двигателя — $W_Ф'$, при котором величины магнитных нагрузок ($B_δ$, $B_Z$, $B_{(,)}$) будут оптимальны на всех участках магнитной цепи. Такой расчет выполняется *методом подбора.*

Полученная по формуле (33) величина магнитного потока Ф* требует уточнения, так как, будучи подставленной в формулу (31), дает, как правило, дробное число витков в обмотке $W_ф$ или такое, при котором они не могут быть разложены равномерно по секциям фазных катушек.

Естественно, такая обмотка невыполнима, потому что, с одной стороны, часть витка в пазы уложить нельзя, с другой, секции в ней имеют разное число витков. Получение же нужной величины магнитного потока возможно, поскольку допустимые пределы магнитной индукции в воздушном зазоре $B_δ$ (табл. 10.1) позволяют взять ее такой, при которой обмотка будет *равносекционной,* т.е. с одинаковым числом витков в каждой секции.

Условие равносекционности обмотки вытекает из выражения числа активных проводников в одном пазу, шт.:

$$N_П = \frac{2 \cdot W_Ф \cdot m \cdot \alpha}{Z}, \qquad (34)$$

где α — число параллельных ветвей, шт.

Виток имеет два активных проводника, тогда $2 \cdot W_Ф \cdot m \cdot \alpha$ — полное число активных проводников в обмотке АД.

*Чтобы число витков в секциях обмотки было одинаковым, необходимо число активных проводников в пазу $N_п$ округлить, при этом для однослойной обмотки просто до целого значения, а для двухслойной — до целого и четного.*

---

* Для выбора $B_δ$ приблизительную полную мощность асинхронного двигателя ($S$ в кВ · А) можно определить по монограмме в зависимости от $D$ приложения — $S_{ДВ} = f(D)$.

После округления $N_п$ уточняется число витков в фазе $W''_Ф$, шт.,

$$W''_Ф = \frac{N_п \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}. \tag{35}$$

Но это еще не все. Полученная равносекционная обмотка с числом витков на фазу $W''_Ф$ должна полностью использовать магнитную систему двигателя по магнитной нагрузке на всех участках ее цепи. В первую очередь, должны строго входить в нормы величины $B_Z$ и $B_C$, приведенные в табл. 10.1, так как электротехническая сталь, как известно, обладает насыщением. Поэтому расчетное повышение магнитных нагрузок ($B_Z$, $B_C$) сверх рекомендованных не приведет к их фактическому значительному увеличению. Резко возрастет лишь ток холостого хода (рис. 30), причем он может оказаться значительно больше номинального. Следовательно, завышение величин $B$ и $I_{Х.Х}$ повысит только нагрев стали сердечника ($P_{Х.Х} = B^2$) и вызовет перегрев обмотки ($P_{КЗ} = I^2$). Занижение величин $B$ (а значит и магнитного потока Ф) уменьшит мощность машины.

***Проверка равносекционной обмотки по нагрузкам.*** Магнитные индукции зависят от величины магнитного потока Ф, который при округлении до $W''_Ф$ изменится и будет равен, Вб:

$$Ф'' = \frac{0{,}97 \cdot U_ф}{4{,}44 \cdot f \cdot К_{ОБ} \cdot W''_Ф}. \tag{36}$$

Так как поток Ф" в магнитной системе электромашины на всех участках неизменный (Ф = const), то значения $B_δ$, $B_Z$, $B_C$ зависят от площадей участков магнитной цепи: в воздушном зазоре — $Q_δ$, в зубцовой зоне — $Q_Z$, в спинке статора — $Q_C$.

Следовательно, плотности магнитного потока (магнитные индукции) на указанных участках будут неодинаковыми и равными, Тл:

$$B_δ = \frac{Ф''}{2/\pi \cdot Q_δ}, \tag{37}$$

$$B_Z = \frac{Ф''}{2/\pi \cdot Q_Z} = B_δ \cdot \frac{Q_δ}{Q_Z}, \tag{38}$$

$$B_C = \frac{\Phi''}{2 \cdot Q_C} = B_\delta \cdot 2 / \pi \cdot \frac{Q_\delta}{2 \cdot Q_C}. \qquad (39)$$

В зубцовой зоне магнитопровода АД распределение магнитной индукции $B_Z$ практически остается таким же, как в воздушном зазоре, поэтому коэффициент $2 / \pi$ в выражении (38) сохраняется, как и при определении $B_\delta$.

В формуле расчета $B_C$ (39) учитывается, что магнитный поток в спинке статора распределяется по всей площади равномерно (отсюда коэффициента $2 / \pi$ — нет), а также то, что в спинке поток разделяется на две части (рис. 48), поэтому в знаменателе — двойка.

Магнитные нагрузки $B_Z$ и $B_C$ сравниваются с допустимыми. Они должны быть в пределах величин, указанных в табл. 10.1, т.е. оптимальными.

Если магнитная нагрузка на каком-либо участке магнитной цепи (в электротехнической стали) выше нормы, необходимо повторить расчет, начиная с формулы $W''_\Phi$ (35), увеличив число проводников в пазу $N_п$; если ниже — необходимо уменьшить число проводников в пазу. Тем самым соответственно уменьшается или увеличивается магнитный поток.

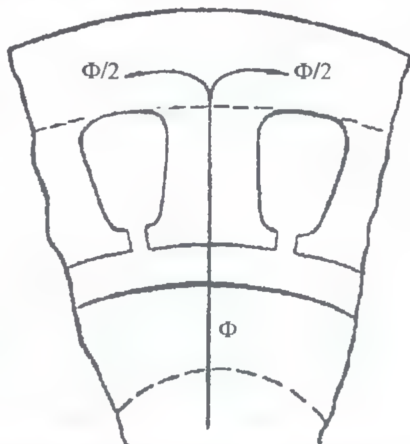


*Рис. 48.* Распределение магнитного потока в спинке статора

Однако, даже если на всех участках магнитной цепи индукции вошли в пределы установленных норм, это не значит, что расчет может быть окончен. Рассчитываемый двигатель должен иметь оптимальные *параметры,* т.е. из его магнитопровода должна быть *«выжата»* максимально возможная мощность. Естественно, при этом $B_\delta$, $B_Z$, $B_C$ должны иметь наибольшие значения из приведенных в табл. 10.1 норм. Для выполнения поставленной цели, меняя $N_п$, выполняют несколько вариантов расчетов магнитных нагрузок.

Для наглядности проводимого подбора рационального числа витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя результаты всех расчетов обычно сводятся в таблицу (табл. 10.2).

*Таблица 10.2.* **Нагрузка магнитной цепи при числе витков** $W_Ф''$

| Величина | Расчетная формула | Варианты расчета | | | Допустимые пределы |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| Проводники в пазу, $N_П$, шт. | $N_П = \dfrac{2 \cdot W_Ф \cdot m \cdot a}{Z}$ | | | | |
| Витки в обмотке одной фазы, $W_Ф''$, шт. | $W_Ф'' = \dfrac{N_п \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}$ | | | | |
| Магнитный поток при $W_Ф''$ | $Ф'' = \dfrac{0{,}97 \cdot U_ф}{4{,}44 \cdot f \cdot K_{ОБ} \cdot W_Ф''}$ | | | | |
| Индукция в воздушном зазоре $B_\delta$, Тл | $B_\delta = \dfrac{\pi \cdot Ф}{2 \cdot Q_\delta}$ | | | | Табл. 10.1 |
| Индукция в зубцовой зоне $B_Z$, Тл | $B_Z = \dfrac{Ф}{2 / \pi \cdot Q_Z}$ | | | | Табл. 10.1 |
| Индукция в спинке статора $B_C$, Тл | $B_C = \dfrac{Ф}{2 \cdot Q_C}$ | | | | Табл. 10.1 |

Вместе с изложенным следует учитывать, что при пересчете АД на другую частоту вращения нарушается согласование площадей участков магнитной цепи ($Q_\delta$, $Q_Z$, $Q_C$). Отсюда магнитная индукция одного из участков в стали ($B_Z$ или $B_C$) может оказаться меньше нормы, тогда как другая — в норме. Однако, если увеличить магнитную индукцию в первом участке, во втором она поднимется сверх нормы. Такое превышение вызывает перегрев стали, ускоренное старение изоляции и выход машины из строя (она просто «сгорит»). Поэтому, несмотря на то, что один из участков магнитной цепи недогружен, а следовательно, будет иметь место некоторое занижение мощности асинхронного двигателя, рациональным числом витков принимается то, при котором ни $B_Z$, ни $B_C$ не выходят за пределы норм.

Кроме того, при *изменении частоты вращения* у асинхронного двигателя после ремонта может иметь место: «залипание» — ротор

не проворачивается при включении машины в сеть, «застревание» — ротор вращается на значительно пониженных оборотах («повышенный шум»).

Причины кроются в содержании высших гармонических составляющих в магнитном потоке электромашины, а это связано с нарушением соотношения между числами зубцов магнитопровода статора ($Z_1$) и ротора ($Z_2$). Вот почему при такой модернизации асинхронного двигателя обязательно проводится проверка на допустимость ее проведения:

для предупреждения *«прилипания»* ротора в момент пуска требуется:

$$Z_2 \neq Z_1; \quad Z_2 \neq 0{,}5 \cdot Z_1; \quad Z_2 \neq 2 \cdot Z_1. \tag{40}$$

Кроме того,

$$Z_2 = (2p \cdot 3) \cdot i, \tag{41}$$

где $i$ — любое целое число, $p$ — число пар полюсов.

Для предупреждения *«застревания»* ротора на пониженной частоте вращения необходимо:

$$Z_2 \neq 2 \cdot p \cdot 3 \cdot i + 2p = 2p \cdot (3 \cdot i + 1). \tag{42}$$

Кроме того,

$$\begin{matrix} Z_2 \neq Z_1 \pm p, & Z_2 \neq Z_1 \pm 2p, \\ Z_2 \neq 0{,}5 \cdot Z_1 \pm p, & Z_2 \neq 2 \cdot Z_1 \pm 2p. \end{matrix} \tag{43}$$

Для предупреждения *«повышенного шума»* электродвигателя требуется:

$$\begin{matrix} Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm 1, \\ Z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p \pm 1). \end{matrix} \tag{44}$$

***Упрощенное определение*** **числа** ***проводников в одном пазу*** $N_П$. Целью расчета является сокращение вычислений подбора рационального числа витков $W_Ф$. Для этого в выражение $N_П$ (34) подставляется значение $W_Ф$ (31) и получается:

$$N_П = \frac{2 \cdot m \cdot a \cdot 0{,}97 \cdot U_Ф}{4{,}44 \cdot f \cdot Ф \cdot К_{ОБ} \cdot Z}. \tag{45}$$

Если $f = 50$ Гц, коэффициент $K_{ОБ} \approx 0{,}97$, то с допустимыми округлениями формула (45) принимает вид

$$N_П = \frac{a \cdot U_Ф}{37 \cdot Ф \cdot Z}. \qquad (46)$$

В полученном выражении неизвестен только магнитный поток Ф. Его можно определить по известным *допустимым* величинам магнитной индукции (табл. 10.1) или в зубцовой зоне $B_Z$ по формуле (38), или в спинке статора $B_С$ по формуле (39), так как Ф на всех участках магнитной цепи неизменен, тогда, Вб:

$$Ф = 2 / \pi \cdot B_Z \cdot Q_Z \qquad (47)$$

или

$$Ф = B_С \cdot 2 \cdot Q_С\ , \qquad (48)$$

где $2 / \pi$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитного потока в зубцовой зоне сердечника статора; 2 — коэффициент в формуле (48) учитывает разделение магнитного потока Ф в спинке статора на два направления.

Следует учитывать, что если магнитопровод рассчитываемой электромашины выполнен для числа полюсов, не соответствующих запроектированной частоте вращения (т.е. $n_н$ — изменено), между площадями магнитной цепи ($Q_\delta$, $Q_С$ и $Q_Z$), как уже говорилось, нарушается согласование. В этом случае формула расчета магнитного потока Ф зависит от соотношения площадей $Q_Z$ и $Q_С$. Причем при

$$\frac{2 \cdot Q_С}{Q_Z} \geq 1{,}15, \qquad (49)$$

($n_з < n_н$, где $n_з$ — заданная заказчиком частота вращения поля) Ф следует определять только по магнитной индукции в зубцовой зоне $B_Z$ (47), если менее 0,75 ($n_з < n_н$), то рассчитывать ее можно только по магнитной индукции в спинке статора $B_С$ (48).

Полученную из формулы (45) или (46) величину числа активных проводников в пазу $N_П$ подставляют в выражение (35) и находят число витков в обмотке одной фазы $W''_Ф$. При этом в случае

сомнения можно вновь определить уточненный магнитный поток — $\Phi$ (36) и индукции: в зубцовой зоне — $B_Z$ (38), в спинке статора — $B_C$ (39), и сравнить результаты с допустимыми величинами табл. 10.1, при необходимости проводится коррекция.

*Число витков в секции обмотки.* *В однослойной обмотке* активные проводники одной секции ($W_C^{(1)}$) полностью занимают паз, поэтому число витков в секции равно числу этих проводников в пазу:

$$W_{1C}^{(1)} = N_П. \qquad (50)$$

*В двухслойной обмотке* в одном пазу лежат активные проводники двух секций, следовательно, число витков в секции ($W_C^{(2)}$) равно половине числа активных проводников в пазу

$$W_{1C}^{(2)} = \frac{N_П}{2}. \qquad (51)$$

***Пример.*** Определить рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя с параметрами: фазное напряжение $U_Ф = 220$ В; частота вращения поля в расточке статора $n = 1500$ мин$^{-1}$; частота тока, $f = 50$ Гц; число пазов в магнитопроводе $Z = 48$ шт.; внутренний диаметр расточки магнитопровода статора $D = 197$ мм; площадь полюса в воздушном зазоре $Q_\delta = 0{,}0224$ м$^2$; в зубцовой зоне $Q_Z = 0{,}0013$ м$^2$; площадь спинки магнитопровода статора $Q_C = 0{,}0051$ м$^2$; полный (диаметральный) шаг обмотки $y = 12$; число пазов на полюс и фазу $q = 4$; число электрических градусов $\alpha = 15$ (эл.гр.); число параллельных ветвей обмотки примем равным единице.

**Решение**

*Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя — $W_Ф$.*

1. Для упрощения определяем дополнительные исходные данные:

1.1. Количество пар полюсов (4):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \text{ шт.}$$

1.2. Приблизительную полную мощность асинхронного двигателя — $S_{ДВ}$ — находим по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{ДВ} = f(D)$ (см. приложение 13). При $D$ 197 мм и числе пар полюсов $P = 2$ шт, $S_{ДВ} \approx 17–18$ кВА.

1.3. Укороченный шаг обмотки с округлением:

$$y = 0{,}8 \cdot y' = 0{,}8 \cdot 12 = 10 \text{ зубцов.}$$

2. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя ($P_Н$) меньше полной на величины cosφ и КПД (η). Учитывая это, рекомендованную магнитную индукцию в воздушном зазоре табл. 10.1 берем в интервале мощностей от 10–100 кВт ($B_\delta = 0{,}7$–$0{,}9$ Тл). По данным осмотра и документов электромашина отработала более половины своего ресурса, отсюда принимаем $B_\delta = 0{,}75$ Тл.

3. Величина магнитного потока (33):

$$\Phi = 2 / \pi \cdot B_\delta \cdot Q_\delta = 2 / 3{,}14 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}0224 = 0{,}011 \text{ Вб.}$$

4. Предварительное число витков в обмотке одной фазы (31):

$$W_\Phi = \frac{0{,}97 \cdot U_\Phi}{4{,}44 \cdot f \cdot \Phi \cdot К_{ОБ}} = \frac{097 \cdot 220}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}011 \cdot 0{,}925} = 94{,}48 \text{ шт.},$$

где $К_{ОБ}$ – обмоточный коэффициент, находим:

- по коэффициенту распределения обмотки (27):

$$К_Р = \frac{\sin(\alpha \cdot q / 2)}{q \cdot \sin(\alpha / 2)} = \frac{\sin(15 \cdot 4/2)}{4 \cdot \sin(15/2)} = 0{,}958,$$

- по коэффициенту укорочения (28):

$$К_У = \sin \cdot (90 \cdot \frac{y}{y'}) = \sin \cdot (90 \cdot \frac{10}{12}) = 0{,}966,$$

следовательно, $К_{ОБ}$ (29):

$$К_{ОБ} = К_р \cdot К_У = 0{,}958 \cdot 0{,}966 = 0{,}925 .$$

Число витков в обмотке $W_Ф$ не может быть дробным, так как 0,48 витка положить в паз невозможно, отсюда (после округления) $W'_Ф = 94$ шт.

5. Для выполнения условия равносекционности определяем число активных проводников в одном пазу (34):

$$N_П = \frac{2 \cdot W'_Ф \cdot m \cdot a}{Z} = \frac{2 \cdot 94 \cdot 3 \cdot 1}{48} = 11{,}75 \text{ шт.}$$

После округления для двухслойной обмотки $N_П = 12$.

6. Следовательно, предварительное число витков в обмотке одной фазы будет равно (35):

$$W''_Ф = \frac{N_П \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{12 \cdot 48}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 96,$$

где $W''_Ф$ — целое и четное число, а значит округлений, изменений не требует.

7. Проверяем нагрузку магнитной цепи сердечника статора АД при $W''_Ф = 96$ витков.

7.1. Магнитный поток (36):

$$Ф = \frac{0{,}97 \cdot U_Ф}{4{,}44 \cdot f \cdot К_{ОБ} \cdot W''_Ф} = \frac{0{,}97 \cdot 220}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}925 \cdot 96} = 0{,}0108 \text{ Вб.}$$

7.2. Магнитные индукции (с округлениями):

- в воздушном зазоре из формулы (37)

$$B_\delta = \frac{Ф}{2/\pi \cdot Q_\delta} = \frac{0{,}0108}{2/3{,}14 \cdot 0{,}0224} = 0{,}727 \text{ Тл},$$

- в зубцовой зоне (38):

$$B_Z = \frac{Ф}{2/\pi \cdot Q_Z} = \frac{0{,}0108}{2/3{,}14 \cdot 0{,}013} = 1{,}3 \text{ Тл.}$$

- в спинке статора (39):

$$B_C = \frac{Ф}{2 \cdot Q_C} = \frac{0{,}0108}{2 \cdot 0{,}0051} = 1{,}06 \text{ Тл.}$$

Из табл. 10.1 видно, что магнитные нагрузки $B_C$ и $B_Z$ меньше допустимых, это позволяет увеличить магнитный поток Ф (без перегрева стали) путем уменьшения числа витков в обмотке. А это, в свою очередь, позволяет увеличить сечение провода в пазу, номинальный ток и мощность АД.

Изменение $N_П$ меняет $W_Ф$, поэтому в формуле (35) принимаем $N_П = 10$ (вместо $N_П = 12$), тогда

$$W''_Ф = \frac{N_П \cdot Z}{2 \cdot m \cdot \alpha} = \frac{10 \cdot 48}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 80 \text{ витков.}$$

Далее расчет выполняется в том же порядке, что и ранее: по формулам (36), (38), (39) рассчитываются Ф, $B_C$ и $B_Z$ с проверкой последних по допустимым величинам табл. 10.1. Для удобства все расчеты сводим в табл. 10.3.

Анализ расчетов показывает, что при числе витков в обмотке одной фазы, равном 80, нагрузки в магнитной цепи сердечника

*Таблица 10.3.* **Нагрузка магнитной цепи при числе витков $W''_Ф$**

| Величина | Расчетная формула | Варианты расчета | | | Допустимые пределы |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| Проводники в пазу, $N_П$, шт. | $N_П = \frac{2 \cdot W''_Ф \cdot m \cdot a}{Z}$ | 12 | 10 | 8 | — |
| Витки в обмотке одной фазы, $W''_Ф$, шт. | $W''_Ф = \frac{N_п \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a}$ | 96 | 80 | 64 | — |
| Магнитный поток при $W''_Ф$, Вб | $Ф = \frac{0{,}97 \cdot U_ф}{4{,}44 \cdot f \cdot К_{ОБ} \cdot W''_Ф}$ | 0,0108 | 0,0130 | 0,016 | — |
| Индукция в воздушном зазоре $B_\delta$, Тл | $B_\delta = \frac{\pi \cdot Ф}{2 \cdot Q_\delta}$ | 0,757 | 0,91 | 1,12 | 0,7–0,9 |
| Индукция в зубцовой зоне $B_Z$, Тл | $B_Z = \frac{Ф}{2/\pi \cdot Q_Z}$ | 1,3 | 1,57 | 1,93 | 1,4–1,8 |
| Индукция в спинке статора $B_C$, Тл | $B_C = \frac{Ф}{2 \cdot Q_C}$ | 1,06 | 1,27 | 1,57 | 1,3–1,6 |

АД наиболее удовлетворяют установленным нормам (табл. 10.1). Повышение или понижение $W''_{\Phi}$ значительно ухудшает загрузку магнитопровода. Отсюда для изготовления двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя принимаем число витков $W_{\Phi} = 80$.

*Рассчитаем число витков в одной секции* двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя $W_{1C}^{(2)}$.

Так как при числе витков в обмотке одной фазы, равной 80, число проводников в одном пазу — 10 ($N_{\Pi} = 10$), тогда для двухслойной обмотки число витков в одной секции будет (51):

$$W_{1C}^{(2)} = \frac{N_{\Pi}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ шт.}$$

***Пример.*** Определим упрощенным методом рациональное число витков в двухслойной обмотке одной фазы и одной секции трехфазного асинхронного двигателя. Данные магнитопровода: внутренний диаметр расточки статора $D = 105$ мм; площадь полюса в зубцовой зоне $Q_Z = 0{,}0032$ м$^2$; площадь спинки статора $Q_C = 0{,}0019$ м$^2$; число пазов $Z = 36$ шт. Технические задания заказчика: фазное напряжение $U_{\Phi} = 220$ В; частота вращения поля в расточке статора 1000 мин$^{-1}$; частота тока $f = 50$ Гц. Число параллельных ветвей обмотки примем равным 1.

**Решение**

*Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя $W_{\Phi}$:*

1. Количество пар полюсов, шт. Из выражения (4) будет:

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3 \text{ шт.}$$

2. Находим приблизительную полную мощность асинхронного двигателя $S_{ДВ}$ по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{ДВ} = f(D)$ (см. приложение 13). При $D = 105$ мм и числе пар полюсов $P = 3$ шт., $S_{ДВ} \approx 1$ кВА. С учетом cosφ и КПД (η) мощность АД $P_{Н}$ — менее 1 кВт.

3. Определяем соотношение площадей в спинке статора и зубцовой зоне магнитопровода (49):

$$\frac{2 \cdot Q_C}{Q_Z} = \frac{2 \cdot 0{,}0019}{0{,}0032} = 1{,}18.$$

4. Расчет магнитного потока выполняем по формуле (47), так как 1,18 > 1,15, т.е. $n_з < n_н$. Для этого по данным табл. 10.1 (в интервале $P_Н$ до 1 кВт) берем $B_Z$ равной 1,4 Тл:

$$Ф = 2 / p \cdot B_Z \cdot Q_Z = 0{,}637 \cdot 1{,}4 \cdot 0{,}0032 = 0{,}0029 \text{ Вб}.$$

5. Число активных проводников в одном пазу (46):

$$N_П = \frac{U_Ф \cdot a}{37 \cdot Ф \cdot Z} = \frac{220 \cdot 1}{37 \cdot 0{,}0029 \cdot 36} = 56{,}95 \text{ шт}.$$

Округляем полученную величину до целого и четного значения $N_П = 58$ проводников.

6. Рассчитаем число витков в обмотке одной фазы трехфазного асинхронного двигателя $W_Ф$ (35):

$$W_Ф'' = \frac{N_П \cdot Z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{58 \cdot 36}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 348 \text{ витков}.$$

Проверим число витков:

- магнитный поток (36):

$$Ф = \frac{U_Ф}{4{,}44 \cdot f \cdot W_Ф''} = \frac{220}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 348} = 0{,}00285 \text{ Вб},$$

где 0,97 в числителе и $К_{ОБ}$ в знаменателе сокращены (близкие по значению);

- магнитная индукция в зубцовой зоне (38):

$$B_Z = \frac{Ф}{2/\pi \cdot Q_Z} = \frac{0{,}00285}{2/3{,}14 \cdot 0{,}0032} = 1{,}398 \text{ Тл};$$

- магнитная индукция в спинке статора (39):

$$B_C = \frac{Ф}{2 \cdot Q_C} = \frac{0{,}00285}{2 \cdot 0{,}0019} = 0{,}75 \text{ Тл}.$$

Величина магнитной индукции $B_C$ значительно ниже допустимой, что объясняется нарушением согласования площадей магнитной цепи, так как заданная заказчиком частота вращения поля в расточке статора ($n_з = 1000$ мин$^{-1}$) не соответствует той, на которую изначально был номинально рассчитан магнитопровод электромашины. Это позволяет, несмотря на остаточный ресурс машины, увеличить индукцию $B_Z$ до максимального значения (1,5 Тл) путем уменьшения числа витков в обмотке одной фазы, т.е. принять $N_П$ равным 54-м активным проводникам. Действительно, в этом случае $W''_Ф$ равно 324 виткам, Ф = 0,003 Вб, $B_Z$ = 1,5 Тл, $B_C$ = 0,79 Тл.

*Нарушение согласования площадей в магнитной цепи электрической машины не только понижает ее мощность, но резко ухудшает эксплуатационные показатели работы двигателя, ведет к перерасходу электрической энергии в сети.* Поэтому ремонт АД с изменением номинальной частоты вращения должен быть обязательно технико-экономически обоснован. Также обязательно требуется проверка согласования числа зубцов статора $Z_1$ и ротора $Z_2$ по формулам (40)–(44).

*Рассчитаем число витков в одной секции* двухслойной обмотки трехфазного асинхронного двигателя $W_{1C}^{(2)}$. Расчет выполним по выражению (51):

$$W_{1C}^{(2)} = \frac{N_П}{2} = \frac{54}{2} = 27 \text{ витков.}$$

## 10.6. Выбор изоляции паза и лобовых частей обмотки

Цель изоляции асинхронного двигателя — обеспечение при соответствующей нагревостойкости требуемой электрической прочности между обмотками разных фаз и магнитопроводом, а также между собой. Кроме того, она должна быть химически стойкой, влаго-водостойкой, механически прочной и пр.

Изоляция паза (рис. 49) состоит из пазовой коробки (гильзы) *1*, межслойной прокладки *2* (если обмотка двухслойная), прокладки под клин *3* и пазового клина *4*. Межфазовые прокладки устанавли-

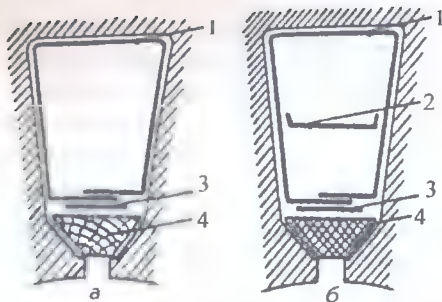


Рис. 49. Изоляция паза двухслойной (а) и однослойной (б) обмоток

ваются в лобовых частях секций или катушечных групп, изолируются внутримашинные соединения, а также металлические бандажи в пазовых и лобовых частях обмоток.

При ремонте асинхронных двигателей серий А, АО, А2, АО2, 4А с нагревостойкостью изоляции А и Е наиболее распространены пазовые коробки (гильзы) из 3-х слоев диэлектриков:

- первый слой (кладется в пазе на магнитопровод), его назначение — защита второго слоя от повреждения листами стали; от этих материалов требуется высокая механическая прочность (электрокартон и др. изделия);
- второй слой — основная электрическая изоляция; от нее требуется высокая электрическая прочность (гибкие пленки, лакоткани и тому подобные материалы);
- третий слой делается из механически прочного диэлектрика. Он так же, как и первый, защищает второй слой от повреждений, но уже от активных проводников, которые помещаются в паз (электрокартон, кабельная бумага и т.п.).

Пазовый короб должен плотно прилегать к стенкам паза, не сминаться при укладке обмотки, быть стойким к надрыву, продавливанию, расслоению и быть достаточно скользким.

Изоляция под бандаж выполняется так же, как и коробка, в три слоя, а междуфазные прокладки в лобовых частях обмотки могут иметь один, два или три слоя в зависимости от используемых материалов.

*Электроизоляционные материалы всех указанных деталей обмоток выбираются в зависимости от класса нагревостойкости, номинального напряжения и мощности, условий работы АД, наличия диэлектрических материалов и по экономическим соображениям.*

В современных электрических машинах с напряжением до 1000 В широко применяются синтетические пленки и материалы, изготовленные с помощью композиционных материалов (пленкоэлектрокартон). Они позволяют значительно сократить толщину изоляции вследствие их высокой электрической, а нередко и механической прочности, что повышает коэффициент заполнения паза.

Полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка ПЭТФ и пленкоэлектрокартон применяются в первую очередь для изготовления пазовых коробок и прокладок. При этом две полоски пленкоэлектрокартона складываются пленкой внутрь. Полиамидная пленка ПМ используется в электрических машинах с нагревостойкостью изоляции до 220 °С.

Фторопластовая пленка Ф–4ЭО, Ф–4ЭН имеет высокую влагостойкость, стойкость к растворителям, воздействию химически активных сред, применяется в машинах специального назначения (например, для работы во фреоновых компрессорах) и в тех случаях, когда нагревостойкость изоляции должна быть выше 220 °С. Однако фторопластовые пленки мягки, поэтому для пазовой изоляции их применяют в сочетании с другими, более жесткими материалами.

Композиционные материалы обладают достаточно высокими механическими свойствами, они поставляются в рулонах.

Пленкосинтокартоны марок ПЭТ–Ф, ПСК–ЛП состоят из пленки ПЭТФ, оклеенной с двух сторон либо бумагой из фенилового волокна (ПСК–Ф), либо бумагой из лавсанового волокна без пропитки (ПСК–Л) или с пропиткой (ПСК–ЛП).

Пленкослюдопласт ГИП–ЛСП–ПЛ представляет собой слой флогопитового слюдопласта, оклеенного с одной стороны стеклотканью, а с другой — пленкой ПЭТФ, широко используется для изоляции обмоток из жестких секций.

Для прокладок в лобовых частях применяются материалы, поверхность которых имеет повышенный коэффициент трения, в частности, кабельную бумагу, тонкий электрокартон, пленколакослюдопласт, пленкоасбестокартон (их используют в двигателях серий А, А2, 4А).

Внутримашинные соединения и выходные концы изолируются электроизоляционными трубками в местах, где они не подвергаются изгибам, кручению и сжатию. При увязке схемы применяют лакированные трубки марок: ТЛВ и ТЛС (на основе стеклянного чулка и масляного лака) — у машин с классом нагревостойкости изоляции *A* для работы в нормальных условиях окружающей среды; ТЭС — для машин с классом нагревостойкости *B* всех исполнений; ТКС — для машин с классом нагревостойкости *F* и *H* химически стойкого исполнения.

Трубки на основе фторорганической резины марки ТРФ наиболее эластичны и стойки к перегибам.

Для механической защиты и закрепления изоляции применяют хлопчатобумажные, стеклянные и лавсановые ленты. Причем хлопчатобумажные ленты используются только в машинах с классом нагревостойкости изоляции *A* и только в пропитанном виде.

Стеклянные ленты пригодны для машин классов нагревостойкости изоляции *E, B, F* и *H* всех исполнений. Для уменьшения выделений из стеклянной ленты пыли при изолировании их пропитывают лаками.

Лавсановые ленты разработаны в последние годы и внедряются в производство. Они могут заменить не только стеклоленты но и шнуры. Их можно использовать для обмоток с классом нагревостойкости изоляции *H*. Лавсановые ленты не требуют пропитки. Толщина их, мм: миткалевой — 0,14, батистовой — 0,15, тафтяной — 0,16. Наиболее часто применяется для обмоток тафтяная лавсановая лента, она выпускается шириной 20, 25, 30 мм. При ширине 20 мм разрывная нагрузка такой ленты составляет 390 Н. Большое преимущество лавсановых лент — их усадка после термообработки, в результате чего происходит дополнительная натяжка изоляции.

Для увязки и бандажировки обмоток статора в лобовых частях применяют хлопчатобумажные шнур-чулки при классе нагревостойкости изоляции *A* и стеклянные шнур-чулки при классах нагревостойкости *B, F, H*.

В заключение выбора материалов (диэлектриков) для пазовой коробки целесообразно проверить полученную изоляцию по величине их суммарной электрической прочности, кВ:

$$\sum E_{пр} = E_{1сл} + ... + E_{nсл}, \qquad (52)$$

$E_{1сл}$ — электрическая прочность диэлектрика 1-го слоя, кВ; $E_{nсл}$ — электрическая прочность *n*-го слоя, кВ.

Суммарная электрическая прочность $\sum E_{пр}$ должна быть обязательно больше испытательного напряжения $U_{ИС}$ электромашины:

$$\sum E_{пр} > U_{ИС}. \qquad (53)$$

Для справки — $U_{ИС}$ низковольтных асинхронных машин мощностью до 1000 кВт и номинальным напряжением свыше 100 В в соответствии с ГОСТом 183-74 равняется $1000 + 2 \cdot U_{ИС}$, но не менее 1500 В.

***Пример.*** Для пазовой гильзы асинхронного двигателя с номинальным напряжением 380/220 В и изоляцией класса *А*, состоящей из трех слоев, выбраны: 1-й слой — электрокартон ЭВС, толщиной δ 0,3 мм, $E_{ПР}$ — 12 кВ/мм, 2-й слой — лакоткань ЛХМ–105, δ 0,17 мм, $E_{ПР}$ — 6 кВ (пробивное напряжение дано для данной толщины диэлектрика), 3-й слой — электрокартон ЭВС, δ 0,2 мм, $E_{ПР}$ — 12 кВ/мм. Проверить выбранные диэлектрики на электрическую прочность изоляции паза: 1-го слоя $E_{ПР} \cdot \delta = 12 \cdot 0{,}3 = 3{,}6$ кВ; 2-го слоя $E_{ПР} = 6$ кВ; 3-го слоя $E_{ПР} \cdot \delta = 12 \cdot 0{,}2 = 2{,}4$ кВ.

Суммарная электрическая прочность пазовой изоляционной коробки (52):

$$\sum E_{пр} = E_{1сл} + ... + E_{nсл} = 3{,}6 + 6 + 2{,}4 = 12 \text{ кВ}.$$

Проверка электрической прочности гильзы (53):

$$\sum E_{пр} > U_{ис} = 1000 + 2U_{н}, \text{ так как } 12 > 1{,}0 + 2 \cdot 0{,}38 \text{ кВ}.$$

Изоляция удовлетворяет поставленным условиям (12>1,76), более того, диэлектрики можно взять меньшей толщины. Однако, учитывая необходимость обеспечения нужной механической прочности изоляции, выбранные материалы можно утвердить.

## 10.7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода

Марка провода выбирается по тем же параметрам, что и изоляции паза: *в зависимости от класса нагревостойкости, номинального напряжения и мощности, условий работы АД, наличия требуемых материалов и по экономическим соображениям*.

После выбора марки выполняется расчет параметров обмоточного провода. Расчетное сечение провода с изоляцией определяется по формуле, мм²:

$$П'_{Р} = \frac{Q_{П} \cdot К'_{З}}{N_{П}}, \tag{54}$$

где $К'_{З}$ — коэффициент заполнение паза, учитывающий, что часть пространства в пазу занято изоляционной гильзой, межслоевой прокладкой (при двухслойной обмотке), прокладкой под клин, клином, прокладкой под гильзу, а также учитывающий неплотность укладки активных проводников в пазу.

Отсюда, $Q_{П} \cdot К'_{З}$ — это активная площадь паза, т.е. та площадь, которая занята в пазу непосредственно изолированными активными проводниками обмотки. Естественно, что ее стремятся получить как можно больше. Вместе с тем при выборе коэффициента $К'_{З}$ следует помнить: если взять его больше, чем допускает изоляция паза, возникают трудности с укладкой секций в пазы; если меньше — это потребует занижения сечения провода, и, в конечном итоге, снизит мощность двигателя.

Рекомендуемые средние значения коэффициентов заполнения паза с конструкциями пазовой изоляции, описанными выше, даны в табл. 10.4.

*Таблица 10.4.* **Коэффициенты заполнения паза**

| Обмотка | $К'_{З}$ при мощности двигателя, кВт | | |
|---|---|---|---|
| | До 1 | 1–10 | 10–100 |
| однослойная<br>двухслойная | 0,40–0,44<br>0,35–0,39 | 0,44–0,48<br>0,38–0,42 | 0,518–0,52<br>0,480–0,52 |

Меньшие значения берутся при меньшей мощности АД и пазовой изоляции на основе толстых диэлектриков, большие — при большей мощности машины и изоляции с использованием тонких диэлектриков.

При круглом сечении провода, исходя из известного выражения площади окружности, определяется диаметр провода с изоляцией, мм$^2$:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot П_р'}{\pi}}.$$

По расчетным $П_р'$ и $d'$ в таблицах ГОСТ или справочников выбирается обмоточный провод стандартного сечения без изоляции ($П_{Р\,ГОСТ}$), его диаметры: с изоляцией ($d'_{ГОСТ}$) и без – ($d_{ГОСТ}$). При этом следует не забывать, что $d'_{ГОСТ}$ определяется толщиной изоляции на проводе, а она зависит от марки и сечения; а также того, что диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2,0 мм меньше ширины шлица паза ($b_Ш$).

В тех случаях, когда диаметр изолированного провода не отвечает поставленному условию, необходимо разделить расчетное сечение $П_р$ на два, три или даже четыре провода с одинаковыми площадями (так называемые *параллельные сечения*). Расчетный диаметр провода с изоляцией и с учетом параллельных сечений, мм$^2$:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot П_р'}{\pi \cdot a'}}. \tag{55}$$

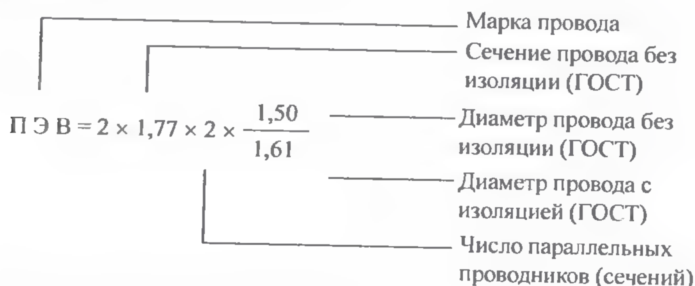
где $a'$ — число параллельных сечений (в общем случае оно не должно быть больше 4).

Вновь по $d'$ выбирается в таблицах ГОСТ или справочников стандартный провод для выбранной марки со всеми его показателями: $П_{Р\,ГОСТ}$, $d'_{ГОСТ}$ и $d_{ГОСТ}$, где $П_{Р\,ГОСТ}$ — сечение без изоляции.

Если число параллельных сечений уже равно четырем ($a' = 4$), а диаметр провода не отвечает ширине шлица паза, уменьшенного на 1,5–2,0 мм, т.е. $d' > b_Ш - (1,5–2)$, по возможности увеличивается число параллельных ветвей ($a$). Для этого, начиная с формулы (34), делается повторный расчет.

Однако, если и в этом случае $d'$ не отвечает ширине шлица паза, $a'$ допускается увеличить до 6.

*Пример:*




***Пример.*** Выбрать марку обмоточного провода для асинхронного двигателя, работающего в условиях ремонтного цеха, с параметрами: номинальное напряжение — 380/220 В; частота тока — 50 Гц; диаметр расточки статора — $D$ = 197 мм; частота вращения поля $n$ = 1500 мин$^{-1}$; сечение паза в свету — $Q_П$ = 132,2 мм$^2$; ширина шлица паза — $b_Ш$ = 3,5 мм; число активных проводников в пазу — $N_П$ = 14 шт.; обмотка двухслойная. Рассчитать и подобрать по таблицам ГОСТ сечение и диаметр провода.

**Решение**

Для упрощения выбора марки провода и его расчета определяем дополнительные исходные данные:

- количество пар полюсов (4):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \text{ шт.},$$

- приблизительную полную мощность асинхронного двигателя $S_{ДВ}$ находим по зависимости от внутреннего диаметра магнитопровода статора $S_{ДВ} = f(D)$ (см. приложение 13). При $D$ = 197 мм и числе пар полюсов $P$ = 2 шт., $S_{ДВ} \approx$ 17–18 кВА.

1. Примем во внимание, что нагревостойкость АД по условиям работы в сухом незапыленном помещении целесообразно отнести к классу *B*. Номинальная мощность его находится в пределах 10–100 кВт. Номинальное напряжение равно 380/220 В. С учетом

стоимости обмоточных проводов наиболее подходящей является марка провода ПЭТВ-2.

2. Расчетное сечение провода с изоляцией находим по выражению (54):

$$П'_{Р} = \frac{Q_{П} \cdot К'_{З}}{N_{П}} = \frac{132 \cdot 0,5}{14} = 4,72\ мм^2,$$

где $К'_{З}$ — коэффициент заполнения паза (принят по табл. 10.4 равным 0,5, так как для изготовления пазовой коробки и внутрипазовых прокладок использованы: пленкосинтокартон ПСК–Ф, стеклотекстолит СТЭФ–1 и тому подобные материалы, обладающие высокой электрической и механической прочностью при малой толщине).

3. Определяем диаметр провода с изоляцией:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot П'_{Р}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,72}{3,14 \cdot 1}} = 2,45\ мм.$$

4. По полученным данным: $П'_{р} = 4,72\ мм^2$ и $d' = 2,45$ мм, выбираем в таблице стандартных проводов (см. приложение 10) для марки ПЭТВ–2 провод диаметром с изоляцией $d'_{ГОСТ} = 2,48$ мм. Его диаметр без изоляции $d_{ГОСТ}$ равен 2,36 мм, сечение $П_{Р\,ГОСТ} = 4,37\ мм^2$.

5. Проверяем возможность прохода провода через шлиц паза. Для этого необходимо выполнение условия $d'_{ГОСТ} < b_{Ш} - (1,5 - 2)$. Но даже если взять меньший предел $b_{Ш} - 1,5 = 3,5 - 1,5 = 2$ мм, оно не выполняется, так как 2,48 мм > 2 мм. Следовательно, при укладке обмоточного провода в паз возможно повреждение изоляции. Учитывая это, принимаем не одно, а два параллельных сечения ($a' = 2$), тогда (54):

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot П'_{р}}{\pi \cdot a'}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,72}{3,14 \cdot 2}} = 1,73\ мм.$$

5.1. По новому $d' = 1,73$ мм выбираем в таблице стандартный провод диаметром с изоляцией $d'_{ГОСТ} = 1,71$ мм. Диаметр без изоляции $d_{ГОСТ} = 1,6$ мм, сечение $П_{Р\,ГОСТ} = 2,01\ мм^2$.

6. Принимаем для изготовления секций два одинаковых по сечению провода $П_{Р\,ГОСТ} = 2{,}01$ мм$^2$ марки ПЭТВ–2 с диаметрами без изоляции — $d_{ГОСТ} = 1{,}6$ мм, с изоляцией $d'_{ГОСТ} = 1{,}71$ мм:

$$ПЭВТ\text{ - }2 = 2 \times 2{,}01 \times 2 \times \frac{1{,}6}{1{,}71}.$$

## 10.8. Расчет размеров секции (длины витка)

Определение длины витка необходимо для наладки шаблона при изготовлении секций катушечных групп, а также для последующих расчетов: массы обмоточного провода для выполнения обмотки, определения сопротивления обмотки постоянному току и пр.

Виток состоит из 2-х активных и 2-х лобовых частей (рис. 37), следовательно, длина витка, м:

$$l_В = 2 \cdot (l_а + l_Л), \qquad (56)$$

где $l_а$ — пазовая (активная) длина витка, м; $l_Л$ — длина лобовой части витка, м.

При отсутствии поперечных каналов охлаждения в магнитопроводе $l_а = l$; длина лобовой части витка обмотки определяется по следующей формуле, м:

$$l_Л = \text{k} \cdot \text{T} + l', \qquad (57)$$

где k — поправочный коэффициент; T — средняя ширина секции, м; $l'$ — коэффициент запаса, м.

Коэффициенты поправочный и запаса зависят от метода изготовления обмотки и количества полюсов асинхронного двигателя (табл. 10.5).

*Таблица 10.5.* **Коэффициенты поправочные и запаса**

| 2*P* | Сердечник статора, намотанный | | | |
|---|---|---|---|---|
| | отдельно | | непосредственно в корпусе | |
| — | k | $l'$, м | k | $l'$, м |
| 2 | 1,25 | 0,02 | 1,30 | 0,03 |
| 4 | 1,30 | 0,02 | 1,35 | 0,03 |
| 6 | 1,40 | 0,02 | 1,50 | 0,03 |
| 8 | 1,50 | 0,02 | 1,55 | 0,03 |

Приведенные в табл. 10.5 величины k и $l'$ используются при расчете длины лобовой части 2-х слойных обмоток с укороченным шагом; для однослойных петлевых обмоток k и $l'$ берутся на 10–15 % больше, чем для двухслойных обмоток, а для однослойных концентрических — больше на 20–23 %.

Средняя ширина секции (под ней понимается длина дуги окружности, центр которой лежит на оси вращения ротора машины, ограниченная активными сторонами одной и той же секции) определяется так, м:

$$\mathrm{T} = \frac{\pi \cdot (D + h)}{Z} \cdot y. \tag{58}$$

***Пример.*** Рассчитать длину витка секции статорной обмотки асинхронного двигателя с параметрами: внутренний диаметр сердечника статора $D$ = 197 мм; высота паза магнитопровода $h$ = 19,1 мм; число пазов $Z$ = 48; укороченный шаг секции обмотки $y$ = 10; полная длина магнитопровода $l$ = 200 мм.

**Решение**

Длина активной части витка $l_а$ = 0,2 м, так как магнитопровод статора не имеет поперечных каналов охлаждения ($l_а = l$).

Средняя ширина секции (58):

$$\mathrm{T} = \frac{\pi \cdot (D + h)}{Z} \cdot y = \frac{3{,}14 \cdot (0{,}197 + 0{,}0191)}{48} \cdot 10 = 0{,}141 \text{ м}.$$

Длина лобовой части витка (57):

$$l_Л = \mathrm{k} \cdot \mathrm{T} + l' = 1{,}35 \cdot 0{,}141 + 0{,}03 = 0{,}22 \text{ м},$$

где k — 1,35; $l'$ — 0,03 м (табл. 10.5).

Длина витка секции (56):

$$l_В = 2 \cdot (l_а + l_Л) = 2 \cdot (0{,}2 + 0{,}22) = 0{,}84 \text{ м}.$$

## 10.9. Расчет массы обмотки

Расчет массы обмотки, в частности, необходим для получения обмоточного провода со склада. Масса металла обмотки определяется путем умножения плотности материала жилы на объем провода, кг:

$$G = m \cdot \gamma \cdot П_{ГОСТ} \cdot a \cdot a' \cdot l_{В} \cdot W_{Ф}, \qquad (59)$$

где $\gamma$ — плотность проводникового материала, кг/м$^3$ (для меди — 8900 кг/м$^3$, для алюминия — 2700 кг/м$^3$); $П_{ГОСТ}$ — сечение одной жилы обмоточного провода без изоляции, м$^2$; $П_{ГОСТ} \cdot a \cdot a'$ — полное сечение одного витка провода в секции, м$^2$; $l_{В} \cdot W_{Ф}$ — длина провода обмотки одной фазы, м; $m$ — число фаз обмотки, шт.

Масса провода обмотки с изоляцией и учетом «срезок» (обрезки обмоточного провода, образующиеся при выполнении технологических процессов пайки и сварки), ориентировочно равна, кг:

$$G' = 1{,}05 \cdot G. \qquad (60)$$

***Пример.*** Рассчитать массу требуемого провода для обмотки трехфазного асинхронного двигателя с параметрами: марка провода — ПЭТ-155; активное сечение провода $П_{ГОСТ} = 3{,}14$ мм$^2$; $a = 1$; $a' = 1$; $l_{В} = 0{,}73$ м; $W_{Ф} = 144$.

**Решение**

Находим массу провода обмотки трехфазного АД по выражению (59). Учитывая, что у марки ПЭТ-155 жила медная, — g = 8900 кг/м$^3$. Для получения объема провода в м$^3$ сечение провода $П_{ГОСТ}$, данное в мм$^2$, приводим к м$^2$ с помощью коэффициента $10^{-6}$, отсюда

$$G' = m \cdot \gamma \cdot П_{ГОСТ} \cdot a \cdot a' \cdot l_{В} \cdot W_{Ф} =$$
$$= 3 \cdot 8900 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}73 \cdot 144 = 8{,}8 \text{ кг}.$$

Масса требуемого обмоточного провода с изоляцией и учетом «срезок» приблизительно равна (60):

$$G' = 1{,}05 \cdot G = 1{,}05 \cdot 8{,}8 = 9{,}24 \text{ кг}.$$

## 10.10. Электрическое сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии

Определяется для сравнения его с результатами измерений сопротивлений фазных обмоток отремонтированной машины при приемосдаточных и типовых испытаниях. Сопоставление величин расчета и испытания дает возможность выявить дефекты, допущенные при ремонте обмоток.

Электрическое сопротивление одной фазы обмотки постоянному току в холодном состоянии ($R$) определяется из выражения, Ом:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{В}} \cdot W_{\Phi}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'}, \qquad (61)$$

где $\rho$ – удельное сопротивление проводника, Ом · мм$^2$/м (в СИ — мкОм · м) для меди (Cu) $\rho = 0{,}0172$ Ом · мм$^2$/м, для алюминия (Al) $\rho = 0{,}028$ Ом · мм$^2$/м, при 20 °С.

***Пример.*** Определить сопротивление обмотки одной фазы, отремонтированного трехфазного асинхронного двигателя в холодном состоянии. Параметры обмотки: марка провода ПЭВ–2; длина витка секции $l_{\text{В}} = 0{,}4$ м; число витков в обмотке одной фазы $W_{\Phi} = 130$; сечение обмоточного провода $\Pi_{\text{ГОСТ}} = 0{,}190$ мм$^2$; число параллельных ветвей $a = 1$; число параллельных сечений $a' = 1$.

**Решение**

Находим сопротивление обмотки по формуле (90):

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{В}} \cdot W_{\Phi}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = 0{,}0172 \cdot \frac{0{,}4 \cdot 130}{0{,}19 \cdot 1 \cdot 1} = 4{,}71 \text{ Ом}.$$

## 10.11. Расчет номинальных данных

Номинальными данными называют оптимальные величины параметров, на которые рассчитана нормальная работа электрооборудования. Основные из них приводятся в паспорте (металлической пластине, прикрепленной к корпусу машины). У асинхронного

двигателя к таким расчетным номинальным данным относятся величины:

$U_H$ – напряжение, В;
$I_H$ – ток, А;
$P_H$ – мощность, кВт;
$f_H$ – частота тока, Гц;
$n_H$ – частота вращения ротора, мин$^{-1}$;
$\cos\varphi_H$ – коэффициент мощности;
$\eta_H$ – коэффициент полезного действия (КПД);
Y/Δ – схема соединения обмотки.

Оптимальность этих показателей связана с конструкцией электромашины, материалами, из которых она изготовлена, условиями ее работы и прочим.

Например, номинальная частота тока $f_H$ в первую очередь связана с ЭДС одного витка (30), чем больше $f$, тем выше $E_{1в}$, следовательно, меньше $W_ф$ (31), т.е. больше мощность электромашины при тех же размерах. Но вместе с увеличением $f$ возрастают потери в листах электротехнической стали, а значит, нагрев машины. Вот почему номинальная частота $f_H$ зависит от марки и толщины листа стали сердечника.

Номинальная частота вращения $n_H$ предопределена частотой вращения подвижных частей машины, которую двигатель вращает.

Номинальная схема соединения обмоток Y/Δ вытекает из требуемой величины напряжения, прилагаемой к фазной обмотке, а также условий пуска машины.

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_H$ определяется рациональным соотношением между составляющими (активной $P$ и реактивной $Q$) полной мощности асинхронного двигателя $S$. Чем больше активная составляющая $P$, тем лучше, так как будут меньше потери в сети.

Номинальный коэффициент полезного действия $\eta_H$ зависит от потерь в электрической машине (в основном в меди обмоток – $P_{КЗ}$ и стали магнитопровода — $P_{XX}$).

Номинальное напряжение $U_H$ связано с электрической прочностью изоляции ($E_{ПР}$) машины. Причем чем выше напряжение, тем больше должна быть прочность, а это связано с родом и толщиной используемых в изоляции составных диэлектриков, их $E_{ПР}$.

Номинальный ток $I_н$ устанавливается температурой нагрева изоляции, в первую очередь, за счет потерь в меди обмотки. Чем выше нагревостойкость изоляции и меньше потери, тем больше номинальный ток.

Номинальная мощность $P_н$ — производная номинальных: тока, напряжения, коэффициентов мощности и полезного действия, а значит зависит от тех же показателей.

Из приведенных величины $U_н, f_н, n_н$ схемы соединения обмотки машины *заданы заказчиком* (начало расчета).

**Номинальный ток.** Номинальный фазный ток двигателя равен произведению плотности тока на активную площадь обмоточного провода с учетом параллельных ветвей и сечений, А:

$$I_{НФ} = j \cdot П_{ГОСТ} \cdot a \cdot a', \qquad (62)$$

где $j$ – плотность тока, А/мм²; $П_{ГОСТ}$ — фактическое сечение провода без изоляции, мм².

Плотность тока, как, и ток, в первую очередь, определяется допустимой температурой нагрева изоляции. Однако на скорость ее старения влияют также и многие другие факторы: способ пропитки обмоток, опыт работы обмотчика, охлаждение АД и др. Поэтому, при выборе $j$ в таблицах справочников (табл. 10.1), где она приводится в зависимости от типа обмоток и мощности двигателей в довольно широких пределах, следует учитывать все параметры. Чтобы не допустить существенной ошибки в выборе плотности тока, найденная по формуле (62) величина фазного тока дополнительно проверяется по величине линейной нагрузки.

Линейная нагрузка двигателя представляет собой произведение тока на число активных проводников во всех пазах электромашины, приходящихся на 1 м длины окружности внутренней расточки статора машины, А/м:

$$A = \frac{I_{НФ} \cdot N_П \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a}. \qquad (63)$$

Результат вычисления линейной нагрузки сравнивается с допустимыми значениями, приведенными в таблицах. Если есть расхож-

дение, то необходимо соответствующим образом изменить плотность тока в обмотке. В идеале оптимальной будет наибольшая возможная плотность тока, даже если она будет больше рекомендованной в таблице (при допустимой А), но вместе с тем следует учитывать сопутствующие факторы: состояние магнитопровода, пропитку обмотки и пр.

**Номинальная мощность.** Для расчета номинальной мощности вначале определяется полная мощность трехфазного асинхронного двигателя, которую он забирает из сети, кВ · А:

$$S_{ДВ} = 3 \cdot I_{НФ} \cdot U_{НФ} \cdot 10^{-3}, \qquad (64)$$

где $I_{НФ}$ — номинальный фазный ток, А; $U_{НФ}$ — номинальное фазное напряжение, В.

Полученная мощность $S_{ДВ}$ в машине идет на создание вращающегося магнитного поля, на потери и выполнение полезной работы.

Однако реактивная составляющая этой мощности — $Q$, затрачиваемая на создание магнитного потока (величина практически постоянная для данного магнитопровода), как известно из курса электротехники, возвращается обратно в сеть. Это учитывается углом φ между полной мощностью и ее активной составляющей. Следовательно (рис. 50, треугольник мощностей), активная составляющая — $P$ (ее называют еще присоединенной мощностью двигателя), затрачиваемая на все остальное, определяется из выражения, кВт:

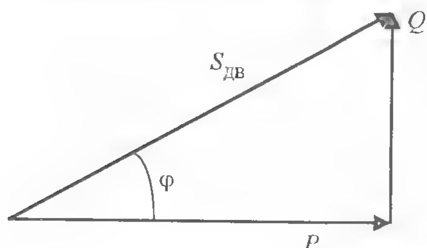


*Рис. 50.* Сумма мощностей трехфазного АД

$$P_{ДВ} = 3 \cdot I_{НФ} \cdot U_{НФ} \cdot \cos\varphi_{Н} \cdot 10^{-3}, \qquad (65)$$

где $\cos\varphi_{Н}$ — номинальный коэффициент мощности.

Расчетная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя на валу (идущая на выполнение полезной работы) определяется по выражению, кВт:

$$P'_H = 3 \cdot I_{НФ} \cdot U_{НФ} \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H \cdot 10^{-3}, \qquad (66)$$

где $\eta$ — номинальный коэффициент полезного действия, который учитывает все активные потери в электрической машине.

Величины коэффициентов мощности $\cos\varphi_H$ и КПД $\eta_H$ можно принять по каталожным данным двигателей, аналогичных рассчитываемому по типу, мощности и частоте вращения или по табл. 10.6.

Полученное значение мощности $P'_H$ округляется до ближайшего стандартного $P_{H(гост)}$ и по известному выражению находится его номинальный ток $I'_{H(гост)}$. Последний еще раз проверяется по линейной нагрузке

$$A = \frac{I_{НФ(гост)} \cdot N_П \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a}.$$

*Таблица 10.6.* **Средние значения коэффициентов мощности и КПД трехфазных асинхронных двигателей**

| Частота вращения, мин$^{-1}$ | КПД и $\cos\varphi$ при мощности, кВт | | |
|---|---|---|---|
| | до 1 | 1–10 | 10–100 |
| 3000 | 0,6–0,77<br>0,7–0,87 | 0,77–0,88<br>0,87–0,90 | 0,88–0,90<br>0,90–0,92 |
| 1500 | 0,57–0,72<br>0,65–0,74 | 0,75–0,86<br>0,81–0,86 | 0,87–0,92<br>0,87–0,91 |
| 1000 | 0,56–0,69<br>0,62–0,72 | 0,74–0,86<br>0,74–0,82 | 0,86–0,92<br>0,86–0,89 |
| 750 | 0,56–0,68<br>0,60–0,62 | 0,70–0,85<br>0,68–0,75 | 0,86–0,92<br>0,80–0,85 |

**Примечание.** Большие значения $\cos\varphi$ и $\eta$ берутся для больших мощностей АД: в числителе — $\eta$, в знаменателе — $\cos\varphi$.

Если полученная линейная нагрузка удовлетворяет допустимой ($A_{доп}$), определяется фактическая плотность тока по формуле, А/мм$^2$:

$$j = \frac{I_{НФ(гост)}}{П_{гост} \cdot a \cdot a'}. \qquad (67)$$

*В случае, когда магнитная система ремонтируемой машины не соответствует исходной номинальной частоте вращения ($n_H$),*

*на которую была рассчитана, а следовательно, нарушена согласованность площадей $Q_\delta$, $Q_Z$, $Q_C$, проверку линейной нагрузки после определения j проводить нерационально, можно ограничиться пределами допустимых плотностей тока (табл. 10.1).*

***Пример.*** Определить номинальную мощность трехфазного асинхронного двигателя с двухслойной обмоткой и изоляцией класса $F$, работающего в условиях повышенной температуры котельной, с расчетными параметрами: номинальное напряжение — 380/220 В; частота тока 50 Гц; частота вращения поля статора (соответствует расчетной) — 1500 мин$^{-1}$; обмоточный провод — ПСД × 2,0 × 2 × 1,6/1,89; число проводников в пазу — 12 шт; число пазов магнитопровода — 48 шт.; внутренний диаметр расточки статора — 197 мм; число параллельных ветвей — 1; число параллельных сечений — 2.

**Решение**

Количество пар полюсов (4):

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \text{ шт.}$$

Приблизительная полная мощность асинхронного двигателя (при $D$ = 197 мм и числе пар полюсов $P$ = 2 (см. приложение 13) — $S_{\text{ДВ}} = f(D)$) $S_{\text{ДВ}} \approx$ 17–18 кВ·А. С учетом cosφ и КПД мощность $P_{\text{Н}}$ на валу будет в пределах 10–100 кВт.

Номинальный ток двигателя (62):

$$I_{\text{НФ}} = j \cdot \Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' = 6 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 24 \text{ А},$$

$j$ по табл. 10.1 принята равной 6 А/ мм$^2$, так как обмотка АД двухслойная, изоляция его и обмоточного провода относится к классу $F$.

Линейная нагрузка при $I_{\text{НФ}}$ = 24 А по формуле (63):

$$\text{A} = \frac{I_{\text{НФ}} \cdot N_{\text{П}} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot \text{a}} = \frac{24 \cdot 12 \cdot 48}{3{,}14 \cdot 0{,}197 \cdot 1} = 22347 \text{ А/м}.$$

Так как расчетная линейная нагрузка (А = 22,35 · 10$^3$ А/м) меньше, чем допустимая (табл. 10.1 — $\text{А}_{\text{ДОП}}$ = 25,0 – 30,0 · 10$^3$ А/м),

принимаем плотность тока $j$ = 7,5 А/мм, тогда номинальный ток машины будет:

$$I_{НФ} = j \cdot П_{ГОСТ} \cdot a \cdot a' = 7,5 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 30,0 \text{ А}.$$

При этом линейная нагрузка составит:

$$A = \frac{I_{НФ} \cdot N_{П} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{30 \cdot 12 \cdot 48}{3,14 \cdot 0,197 \cdot 1} = 27935 = 27,9 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Отсюда при номинальном токе $I_{НФ}$ = 30,0 А линейная нагрузка находится в пределах нормы $A_{ДОП}$.

Полная мощность асинхронного двигателя (64):

$$S_{ДВ} = 3 \cdot I_{НФ} \cdot U_{НФ} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 30 \cdot 220 \cdot 10^{-3} = 19,8 \text{ кВ·А}.$$

В табл. 10.6 для мощностей АД в пределах 10–100 кВт при числе оборотов поля в расточке статора 1500 мин$^{-1}$ коэффициент мощности (cosφ) можно принять равным 0,87, а КПД (η) = 0,87, тогда присоединенная мощность АД (65):

$$P_{ДВ} = 3 \cdot I_{НФ} \cdot U_{НФ} \cdot \cos\varphi_{Н} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 30 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 10^{-3} = 17,23 \text{ кВт}.$$

Расчетная номинальная мощность асинхронного двигателя $P'_{Н}$ (66):

$$P'_{3} = 3 \cdot I_{НФ} \cdot U_{НФ} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{Н} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 30 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} = 14,99 \text{ кВт}.$$

Ближайшая стандартная номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с расчетными параметрами (по справочнику) будет:

$P_{Н}$ = 15 кВт; $U_{НФ}$ = 220 В; $n_{Н}$ = 1500 мин $^{1}$; cosφ = 0,88; η = 0,885.

Номинальный ток:

$$I_{Н(гост)} = \frac{P_{Н} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{НФ} \cdot \cos\varphi_{Н} \cdot \eta_{Н}} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,885} = 29,2 \text{ А}.$$

Линейная нагрузка АД при $I_{Н}$ = 29,2 А:

$$A = \frac{I_{НФ} \cdot N_{П} \cdot Z}{\pi \cdot D \cdot a} = \frac{29,2 \cdot 12 \cdot 48}{3,14 \cdot 0,197 \cdot 1} = 27 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Так как расчетная линейная нагрузка (А = 27,19 А/м) отвечает допустимой (табл. 1 — $А_{доп} = 25{,}0 - 30{,}0 \cdot 10^3$ А/м), определяем фактическую плотность тока (67):

$$j = \frac{I_{\text{НФ}_{(\dots)}}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = \frac{29{,}2}{2 \cdot 1 \cdot 2} = 7{,}3 \text{ А/мм}^2.$$

# Глава 11. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных двигателей на другие параметры

Каждый хороший специалист должен уметь максимально упрощать расчеты. Это не просто облегчает работу, но дает возможность экономить и время, и средства. Сказанное в полной мере относится к нашим расчетам.

Например, при модернизации трехфазных асинхронных двигателей, когда их надо включить на другое напряжение или получить у электромашин другую частоту вращения ротора и при этом известны все данные старой обмотки, тогда нет необходимости проводить расчеты новых обмоток в полном объеме. В таких случаях делается упрощенный перерасчет.

## 11.1. Перерасчет асинхронного двигателя на другое напряжение

Для определения параметров новой обмотки пользуются формулами ранее проведенного расчета. Число витков в обмотке одной фазы машины (31):

$$W_{\Phi} = \frac{0{,}97 \cdot U_{\Phi}}{4{,}44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{\text{ОБ}}}, \quad \text{отсюда} \quad W_{\Phi} = \frac{0{,}97 \cdot U_{\Phi}}{E_{1\text{В}}}, \qquad (68)$$

так как при изменении напряжения старого $U_{\Phi C}$* на новое $U_{\Phi H}$* магнитная система двигателя и частота тока для рассматриваемых обмоток не изменяются, то ЭДС одного витка — также величина постоянная ($E_{1В} = 4{,}44 \cdot f \cdot \Phi \cdot К_{ОБ}$).

Из формул (68) для статорной обмотки, если

$$W_{\Phi.С} = \frac{0{,}97 \cdot U_{\Phi.С}}{E_{1В}}, \quad \text{отсюда} \quad E_{1В} = \frac{0{,}97 \cdot U_{\Phi\,С}}{W_{\Phi.С}}. \qquad (69)$$

Для новой обмотки, если

$$W_{\Phi.Н} = \frac{0{,}97 \cdot U_{\Phi.Н}}{E_{1В}}, \quad \text{то} \quad E_{1В} = \frac{0{,}97 \cdot U_{\Phi.Н}}{W_{\Phi.Н}}. \qquad (70)$$

При равенстве в выражениях (69) и (70) $E_{1В}$ получается, что

$$W_{\Phi.Н} = W_{\Phi.С} \cdot \frac{U_{Н}}{U_{С}}. \qquad (71)$$

Изменение числа витков в фазе пропорционально меняет число активных проводников в пазу $N_{П}$ (34), тогда

$$N_{П.Н} = N_{П.С} \cdot \frac{U_{Н}}{U_{С}}. \qquad (72)$$

Сделанные преобразования позволяют получить новые сечения $П_{Р.Н}$ и диаметр $d'_{Н}$ обмоточного провода новой обмотки из выражений:

$$П_{Р.Н} = П_{Р.С} \cdot \frac{U_{С}}{U_{Н}}, \qquad (73)$$

$$d'_{Н} = d'_{С} \cdot \sqrt{\frac{U_{С}}{U_{Н}}}. \qquad (74)$$

По значениям $П_{Р.Н}$ и $d'_{Н}$ в таблицах справочников, приложениях 10, 11 находится стандартный провод. Проверка его по размеру шлица паза выполняется так же, как было рассмотрено ранее.

---

* Индексы С и Н указывают старые и новые величины.

Учитывая, что изменений в количестве полюсов при новой обмотке нет, все обмоточные данные ($a, y, q, N$ и $\alpha$) берутся по показателям старой обмотки, следовательно, схема обмотки в электродвигателе остается неизменной. Остаются прежними: размер витка $l_В$, масса обмоточного провода $G'$ (потому что изменение $W_Ф$ пропорционально изменению сечения провода $П_р$), без изменения остается и номинальная мощность машины $P_Н$ (так как изменение номинального тока $I_Н$ пропорционально номинальному напряжению $U_Н$).

Целесообразно проверить только сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии — $R$.

***Пример 4.1.*** Пересчитать двухслойную обмотку трехфазного асинхронного двигателя с напряжения 380/220 В на напряжение 220/127 В.

Условия работы двигателя оставить без изменения.

Параметры старой обмотки: число витков в обмотке одной фазы $W_{Ф.С} = 144$ шт.; число параллельных ветвей $a_С = 1$; длина витка секции обмотки $l_В = 0{,}73$ м; число проводников в одном пазу $N_{П.С} = 18$ шт.; обмоточный провод ПЭТ–155 × 3,14 × 1 × 2,0/2,1; сопротивление обмотки фазы постоянному току $R = 0{,}587$ Ом; ширина шлица паза $b_Ш = 3{,}7$ мм.

**Решение**

Определим новые параметры обмотки:

1. Число витков в обмотке одной фазы (71):

$$W_{Ф.Н} = W_{Ф.С} \cdot \frac{U_Н}{U_С} = 144 \cdot \frac{127}{220} = 83{,}12 \text{ шт.}$$

Округляем до ближайшего целого и четного значения $W_{Ф.Н} = 84$ шт.

2. Число витков в одной секции $W_{С.Н}$ равно половине числа проводников в одном пазу $N_{П.Н}$ (72):

$$N_{П.Н} = N_{П.С} \cdot \frac{U_Н}{U_С} = 18 \cdot \frac{127}{220} = 10{,}39 \text{ шт.}$$

Для двухслойной обмотки округляем $N_{П.Н}$ до 10.

3. Число витков в одной секции (51):

$$W_C^{(2)} = \frac{N_П}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ шт.}$$

4. Выбираем обмоточный провод для новой обмотки:

- условия работы электрической машины не изменились, следовательно, изоляцию ее можно оставить прежней, принимаем марку провода ПЭТ-155;
- новое сечение обмоточного провода $П_{Р.Н}$ (73):

$$П_{Р.Н} = П_{Р.С} \cdot \frac{U_С}{U_Н} = 3{,}14 \cdot \frac{220}{127} = 5{,}44 \text{ мм}^2.$$

- диаметр провода с изоляцией новой обмотки $d'_Н$ (74):

$$d'_Н = d'_С \cdot \sqrt{\frac{U_С}{U_Н}} = 2{,}12 \cdot \sqrt{\frac{220}{127}} = 3{,}67 \text{ мм.}$$

В таблице стандартных проводов (приложение 10) обмоточный провод ПЭТ–155 требуемого диаметра отсутствует. Принимаем два параллельных сечения ($a' = 2$); тогда $П_{Р.Н} = 5{,}44 : 2 = 2{,}72$ мм$^2$, по формуле диаметр провода без изоляции

$$d'_Н = \sqrt{\frac{4 \cdot П_{Р.Н}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}72}{3{,}14}} = 1{,}86 \text{ мм.}$$

По стандарту $d_{ГОСТ} = 1{,}9$ мм, $П_{Р.Н(гост)} = 2{,}83$ мм$^2$; диаметр провода ПЭТ-155 с изоляцией $d'_{ГОСТ} = 2{,}02$ мм.

Проверка возможности прохода провода через шлиц пазка:

$$d'_{ГОСТ} < b_Ш - (1{,}5 - 2)\,; \quad 2{,}02 < 3{,}7 - 1{,}5 \text{ мм.}$$

Условие укладки активных проводников в паз выполнено, следовательно, принимаем для изготовления новой обмотки провод

$$ПЭВ = 155 \times 2{,}83 \times 2 \times \frac{1{,}90}{2{,}02}.$$

5. Сопротивление обмотки одной фазы в холодном состоянии (61):

$$R = \rho \cdot \frac{l_{В} \cdot W_{Ф}}{П_{ГОСТ} \cdot a \cdot a'} = 0{,}0172 \cdot \frac{0{,}73 \cdot 84}{2{,}83 \cdot 1 \cdot 2} = 0{,}71 \text{ Ом}.$$

Все остальные параметры новой обмотки асинхронного двигателя практически должны соответствовать старой.

## 11.2. Перерасчет асинхронного двигателя на другую частоту вращения

Перерасчет начинают с того, что проверяют возможность использования магнитопровода данной машины техническому заданию на новую частоту вращения поля в расточке статора.

При изменении частоты ($n_{Н}$) после ремонта может иметь место: «залипание» или «застревание» ротора машины на пониженных оборотах, а также может появиться «повышенный шум».

В том случае, если расчеты по формулам (40–44) дали положительный результат, можно приступить к пересчету обмотки. Причем расчетные формулы определения новых параметров обмотки получаются путем преобразования уже известных выражений.

Число витков в обмотке одной фазы (31)

$$W_{Ф} = \frac{0{,}97 \cdot U_{Ф}}{4{,}44 \cdot f \cdot Ф \cdot К_{ОБ}}, \quad \text{или} \quad 0{,}97 \cdot U_{Ф} = 4{,}44 \cdot f \cdot Ф \cdot К_{ОБ} \cdot W_{Ф},$$

но, так как $Ф = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta}$, а частота тока $f = \frac{P \cdot n}{60}$, то тогда

$$0{,}97 \cdot U_{Ф.С} = 4{,}44 \cdot \frac{P_{С} \cdot n_{С}}{60} \cdot 2/\pi \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta С} \cdot К_{ОБ} \cdot W_{Ф.С};$$

$$0{,}97 \cdot U_{Ф.Н} = 4{,}44 \cdot \frac{P_{Н} \cdot n_{Н}}{60} \cdot 2/\pi \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta Н} \cdot К_{ОБ} \cdot W_{Ф.Н}.$$

Если величины фазных напряжений равны ($U_{Ф.С} = U_{Ф.Н}$), то

$$4{,}44 \cdot \frac{P_{С} \cdot n_{С}}{60} \cdot 2/\pi \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta С} \cdot К_{ОБ} \cdot W_{Ф.С} =$$

$$= 4{,}44 \cdot \frac{P_{Н} \cdot n_{Н}}{60} \cdot 2/\pi \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta Н} \cdot К_{ОБ} \cdot W_{Ф.С}.$$

Сократив в правой и левой части равенства одинаковые величины и учитывая, что произведения $P_C \cdot Q_{\delta.C}$ и $P_H \cdot Q_{\delta.H}$ равны (это площадь одной и той же расточки статора), получим при переводе электродвигателя на большую частоту вращения ($n_H > n_C$):

$$W_{\Phi.H} = W_{\Phi.H} \cdot \frac{n_C}{n_H \cdot k_\Pi}, \quad \text{тогда и} \quad W_{сек.H} = W_{сек.C} \cdot \frac{n_C}{n_H \cdot k_\Pi},$$

где $W_{сек}$ — число витков в одной секции обмотки, шт.

Изменение $W_{\Phi.H}$, а значит и $W_{сек.H}$, а также числа активных проводников в одном пазу изменит сечение провода обмотки $\Pi_p$ и мощность $P_H$ машины. Проведенные преобразования дают следующие выражения:

$$\Pi_{P.H} = \Pi_{P.C} \cdot \frac{n_H \cdot k_\Pi}{n_C};$$

$$P_{H.H} = P_{H.C} \cdot \frac{n_H \cdot k_\Pi}{n_C}.$$

При уменьшении частоты вращения электродвигателя ($n_H < n_C$) число витков в одной секции будет равно

$$W_{сек.H} = W_{сек.C} \cdot \frac{n_C \cdot k_\Pi}{n_H}, \tag{75}$$

где $K_\Pi$ — поправочный коэффициент перерасчета, равный 0,65–0,85.

Сечение провода в обмотке $\Pi_p$ и мощности электромашины $P_H$:

$$\Pi_{P.H} = \Pi_{P.C} \cdot \frac{n_H}{n_C \cdot k_\Pi}; \tag{76}$$

$$P_{H.H} = P_{H.C} \cdot \frac{n_H}{n_C \cdot k_\Pi}. \tag{77}$$

Главное условие при перерасчете – *сохранение допустимых величин магнитных нагрузок в магнитопроводе статора* ($B_\delta$, $B_Z$, $B_C$) ***неизменными*** (табл. 10.2). Не должно меняться также и напряжение, приложенное к обмотке.

Чем больше разница между старой и новой частотами вращения, тем меньшим принимают значение поправочного коэффициента.

Введение поправочного коэффициента $k_П$ обусловлено тем, что при уменьшении числа полюсов (увеличении частоты вращения) и при сохранении индукции в воздушном зазоре возрастает индукция в спинке статора, в зубцах статора она остается неизменной. При увеличении числа полюсов (уменьшении частоты вращения) имеет место обратная зависимость.

Пересчитываются и обмоточные данные, при этом шаг и число пазов на полюс и фазу можно находить по выражениям

$$y_Н = y_С \cdot \frac{n_Н}{n_С}; \tag{78}$$

$$q_Н = q_С \cdot \frac{n_Н}{n_С}. \tag{79}$$

Схема обмотки при переходе на другую частоту вращения изменяется, значит необходимо рассчитать все недостающие обмоточные данные.

***Пример.*** Пересчитать двухслойную обмотку трехфазного асинхронного двигателя $P_Н$ = 22 кВт; $U_Н$ = 380/220 В; $f$ = 50 Гц; $I_Н$ = 42,9 А; Y/Δ; $\cos\varphi_Н$ = 0,87; $\eta_Н$ = 0,905 с частоты вращения $n$ = 1500 мин$^{-1}$ на частоты: $n$ = 750 мин$^{-1}$; $n$ = 1000 мин$^{-1}$. Условия работы двигателя оставить без изменения.

Параметры старой обмотки: петлевая, двухслойная; число витков в одной секции $W_{сек}^{(2)} = 6$; марка и размеры обмоточного провода ПСД × 2,0 × 2 × 1,6/1,89; число параллельных сечений а′ = 2; число параллельных ветвей $a = 1$; длина витка $l_В$ = 0,812 м; количество фазных катушек $N_{3ф}^{(2)} = 12$; полный шаг обмотки $y' = 12$; число секций в катушечной группе $q = 4$.

Число зубцов статора $Z_1 = 48$; число зубцов ротора $Z_2 = 36$. Диаметр внутренней расточки статора $D$ = 197 мм; длина магнитопровода $l$ = 200 мм; высота паза $h$ = 0,0191 мм; ширина шлица паза $b_ш$ = 3,7 мм.

**Проверка**

1. Проверяем допустимость проведения пересчета старой обмотки на новое число оборотов $n = 750$ мин$^{-1}$, в этом случае количество пар полюсов:

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4 \text{ шт.}$$

Проверка на «*прилипание*» по выражению (40):

$Z_2 \neq Z_1$ — $36 \neq 48$; $Z_2 \neq 0{,}5 \cdot Z_1 \cdot 36 \neq 0{,}5 \cdot 48$; $Z_2 \neq 2 \cdot Z_1$ — $36 \neq 2 \cdot 48$ — требованиям по этим позициям удовлетворяются, но по формуле (41):

$$Z_2 = (2p \cdot 3) \cdot i, \text{ однако } 36 \neq (2 \cdot 4 \cdot 3) \cdot 1; \quad 36 \neq (2 \cdot 4 \cdot 3) \cdot 2,$$

т.е. ни при $i = 1$, ни при $i = 2$ равенство не выдерживается. Следовательно, на данном магнитопроводе новая обмотка для $n_{\text{Н}} = 750$ мин$^{-1}$ *выполнена быть не может*.

2. Проверяем допустимость проведения пересчета старой обмотки на новое число оборотов $n = 1000$ мин$^{-1}$, в этом случае количество пар полюсов:

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3 \text{ шт.}$$

Проверка на «*прилипание*» по формулам (40) и (41):

$Z_2 \neq Z_1 - 36 \neq 48$; $Z_2 \neq 0{,}5 \cdot Z_1 - 36 \neq 0{,}5 \cdot 48$; $Z_2 \neq 2 \cdot Z_1 - 36 \neq 2 \cdot 48$ принимаем $i = 2$, тогда:

$$Z_2 = (2p \cdot 3) \cdot I - 36 = (2 \cdot 3 \cdot 3) \cdot 2,$$

по всем уравнениям требования удовлетворяются.

Проверка на «*застревание*» ротора на пониженной частоте вращения. Принимаем: $i = 1$ и $i = 2$, тогда по формулам (42), (43):

$$Z_2 \neq 2p \cdot (3i + 1) \text{ — } 36 \neq 2 \cdot 3 \cdot (3 \cdot 1 + 1) \quad \text{и} \quad 36 \neq 2 \cdot 3 \cdot (3 \cdot 2 + 1),$$

$$Z_2 \neq Z_1 \pm p \text{ — } 36 \neq 48 + 3, \quad \text{и} \quad 36 \neq 48 - 3;$$

$$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p \text{ — } 36 \neq 48 + 2 \cdot 3, \quad \text{и} \quad 36 \neq 48 - 2 \cdot 3;$$

$$Z_2 \neq 0{,}5 \cdot Z_1 \pm p \text{ — } 36 \neq 0{,}5 \cdot 48 + 3, \quad \text{и} \quad 36 \neq 0{,}5 \cdot 48 - 3;$$

$$Z_2 \neq 2 \cdot Z_1 \pm 2p \text{ — } 36 \neq 2 \cdot 48 + (2 \cdot 3), \quad \text{и} \quad 36 \neq 2 \cdot 48 - (2 \cdot 3);$$

по всем уравнениям требования удовлетворяются.

Проверка на «*повышенный шум*». Принимаем $i = 2$, по выражению (44):

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3 \cdot i \pm 1 — 36 \neq 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 + 1 \quad \text{и} \quad 36 \neq 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 - 1;$$

$$Z_2 \neq 2p \cdot 3 \cdot i \pm (2p \pm 1) — 36 \neq 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 + (2 \cdot 3 + 1) \quad \text{и}$$

$$36 \neq 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 + (2 \cdot 3 - 1)$$

$$36 \neq 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 — (2 \cdot 3 + 1) \quad \text{и} \quad 36 \neq 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 - (2 \cdot 3 - 1),$$

по всем уравнениям требования удовлетворяются.

Исходя из проведенной проверки пересчет старой обмотки при частоте вращения поля в расточке статора АД $n$ = 1500 мин$^{-1}$, на новую обмотку, с частотой вращения $n$ = 1000 мин$^{-1}$, ***допустим***.

**Решение**

Проведем расчет параметров новой обмотки.

Так как 1000 < 1500, т.е. $n_{\text{Н}} < n_{\text{С}}$, для перерасчета воспользуемся выражениями:

1. Число витков в одной секции (75):

$$W_{\text{сек.Н}}^{(2)} = W_{\text{сек.С}}^{(2)} \cdot \frac{n_{\text{С}} \cdot \text{k}_{\text{П}}}{n_{\text{Н}}} = 6 \cdot \frac{1500 \cdot 0{,}8}{1000} = 7{,}2 \text{ шт.}$$

Округляем до 7 витков, тогда у двухслойной обмотки в пазу будет 14 активных проводников ($N_{\text{П.Н}} = 14$), следовательно, число витков в обмотке одной фазы будет равно:

$$W_{\text{Ф.Н}} = \frac{N_{\text{П.Н}} \cdot Z}{2 \cdot m \cdot \text{a}} = \frac{14 \cdot 48}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 112 \text{ шт.}$$

2. Рассчитаем данные нового обмоточного провода и выберем его. Находим сечение провода (76)

$$\Pi_{\text{Р.Н}} = \Pi_{\text{Р.С}} \cdot \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}} \cdot \text{k}_{\text{П}}} = 2{,}0 \cdot \frac{1000}{1500 \cdot 0{,}8} = 1{,}66 \text{ мм}^2.$$

По заданию условия работы двигателя остаются неизменными, поэтому марку провода оставляем прежней — ПСД. По полученному сечению $\Pi_{\text{Р.Н}}$ находим диаметр нового провода:

$$d'_{\text{Н}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \Pi_{\text{Р.Н}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}66}{3{,}14}} = 1{,}45 \text{ мм.}$$

В ГОСТе диаметра такого провода для марки ПСД нет. Принимаем $d'_{\text{Н(ГОСТ)}} = 1{,}47$ мм.

Отсюда новый обмоточный провод в соответствии с ГОСТом будет

$$\text{ПСД} \times 1{,}09 \times \frac{1{,}18}{1{,}47}.$$

Проверка возможности прохода провода через шлиц паза

$$d'_{\text{ГОСТ}} < b_{\text{Ш}} - (1{,}5 - 2) - 1{,}47 < 3{,}7 - 1{,}5 \text{ мм.}$$

Условия укладки активных проводников в паз выполнено.

3. Определим новые обмоточные данные по формулам:

шаг обмотки (78):

$$\text{полный — } y'_{\text{Н}} = y_{\text{С}} \cdot \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}}} = 12 \cdot \frac{1000}{1500} = 8;$$

$$\text{укороченный — } y_{\text{Н}} = 0{,}8 \cdot y'_{\text{Н}} = 0{,}8 \cdot 8 = 6{,}4.$$

Принимаем укороченный шаг равным 6.

Число пазов на полюс и фазу (число секций в фазной катушке) (79):

$$q_{\text{Н}} = q_{\text{С}} \cdot \frac{n_{\text{Н}}}{n_{\text{С}}} = 4 \cdot \frac{1000}{1500} \approx 2{,}66 = 2\frac{2}{3},$$

обмотка выполнима только при разном числе секций в катушечных группах и неполном заполнении пазов в расточке статора.

Число катушечных групп (фазных катушек) (17)

$$N^{(2)}_{\text{Н.З.Ф}} = 2P \cdot m = 2 \cdot 3 \cdot 3 = 18.$$

4. Рассчитаем длину витка секции новой обмотки.

Длина активной части витка $l_{\text{а}} = 0{,}2$ м, так как магнитопровод статора не имеет поперечных каналов охлаждения ($l_{\text{а}} = l$).

Средняя ширина секции (58):

$$T = \frac{\pi \cdot (D+h)}{Z} \cdot y = \frac{3{,}14 \cdot (0{,}197 + 0{,}0191)}{48} \cdot 6 = 0{,}085 \text{ м}.$$

Длина лобовой части витка по выражению (57):

$$l_{л} = k \cdot T + l' = 1{,}55 \cdot 0{,}085 + 0{,}03 = 0{,}162 \text{ м},$$

где поправочный коэффициент k равен 1,55 (табл. 10.5); коэффициент запаса $l'$ — 0,03 м (табл. 10.5).

Длина витка секции (56):

$$l_{в.н} = 2 \cdot (l_{а} + l_{л}) = 2 \cdot (0{,}2 + 0{,}162) = 0{,}724 \text{ м}.$$

5. Найдем массу провода новой обмотки по формуле (59):

$$G = m \cdot \gamma \cdot П_{рГОСТ} \cdot a \cdot a' \cdot l_{в} \cdot W_{ф} =$$
$$= 3 \cdot 8900 \cdot 1{,}09 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}724 \cdot 112 = 2{,}16 \text{ кг}.$$

С учетом изоляции и «срезок» — по уравнению (60):

$$G' = 1{,}05 \cdot G = 1{,}05 \cdot 2{,}16 = 2{,}27 \text{ кг}.$$

6. Определим сопротивление новой обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии по формуле (61):

$$R = \rho \cdot \frac{l_{в.н} \cdot W_{ф.н}}{П_{р.н\,(гост)} \cdot a \cdot a'} = 0{,}0172 \cdot \frac{0{,}724 \cdot 112}{1{,}09 \cdot 1 \cdot 1} = 1{,}28 \text{ Ом}.$$

7. Новая мощность АД после пересчета обмотки на новую частоту вращения поля в расточке статора, равную 1000 мин$^{-1}$ (77):

$$P_{н.н} = P_{н.с} \cdot \frac{n_{н}}{n_{с} \cdot k_{п}} = 22{,}0 \cdot \frac{1000}{1500 \cdot 0{,}8} = 18{,}3 \text{ кВт}.$$

## 11.3. Рекомендации по использованию ЭВМ для выполнения расчетов асинхронного двигателя при перемотке

На основе изложенной методики можно составить программу для работы на ЭВМ по расчетам статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя при ремонте: с другими фазными напря-

жениями ($U_Ф$), с другими частотами вращения магнитного поля в расточке статора ($n$), с другой частотой тока ($f$).

Проведенные по ней дополнительные расчеты дают возможность выполнить анализ влияния на параметры асинхронного двигателя выше указанных показателей ($U_Ф$, $n$, $f$) и ответить на вопросы:

1. Как отражается на величинах магнитных индукций изменение частоты вращения магнитного поля и почему? Определите наиболее рациональную частоту вращения магнитного поля в расточке статора для заданного вам магнитопровода.

2. На каких параметрах асинхронного двигателя отражается изменение фазного напряжения и как?

3. На каких параметрах асинхронного двигателя отражается изменение частоты тока и как?

4. На каких параметрах отражается выбор типа обмотки асинхронного двигателя?

5. Дайте аргументированное заключение о типе наиболее рациональной статорной обмотки для заданного магнитопровода асинхронного двигателя с учетом фазного напряжения, частоты вращения поля, частоты тока.

Для наглядности при анализе результатов расчеты на ЭВМ желательно свести в таблицу по форме, указанной в приложении 1.

# Глава 12. Изолировочно-обмоточные работы по изготовлению статорных обмоток из мягких секций

Работы выполняются в специально оборудованном обмоточном отделении. Ему положено иметь приточно-вытяжную вентиляцию, столы (желательно целевой конструкции), подъемно-транспортные приспособления, инструмент обмотчика электрических машин.

Целесообразна централизованная система сжатого воздуха (в малых мастерских для тех же целей можно использовать бытовые пылесосы), приспособления, приборы и т.п.

Основная масса современных асинхронных двигателей сельской электрификации имеет тип А2, А02, 4А или АИР при средней мощности 5–7 кВт, напряжении 380/220 В, частоте 50 Гц, форме пазов магнитопровода полузакрытой. Такие машины, как правило, выполняются со статорными обмотками из «мягких секций» (они также называются всыпными или шаблонно-рассыпными), изготавливаются из круглого провода. Обмотки роторов чаще всего делаются короткозамкнутыми. Вот почему в дальнейшем ремонту таких обмоток будет уделено наибольшее внимание.

## 12.1. Изоляция пазов

Работы начинаются с зачистки пазов от остатков старой изоляции, коррозии, лака и других загрязнений. Выполняются они с помощью обычных и металлических щеток, скребков, сжатого воздуха. Могут использоваться специальные станки и приспособления. Например, ручные, пневматические или электрические машинки со стальными щетками на валу, вращающиеся с частотой 3000 об/мин.

*Заготовка изоляции.* При изготовлении изоляционной коробочки (иначе, коробки, гильзы) следует, в первую очередь, определить раскрой материалов, при котором обеспечивается минимальный их отход. Резка заготовок, как правило, выполняется на рычажных ножницах, имеющих ограничительные и прижимные планки.

Электрокартон режут так, чтобы направление волокон в уложенных в паз коробочках совпадало с продольной осью двигателя.

В ремонтной практике пазовая коробочка (коробка) для машин с изоляцией класса *А* и *Е* обычно изготавливается из двух полосок пленкоэлектрокартона или электрокартона и одной полоски лакоткани. В настоящее время чаще вместо лакоткани используют изоляционные пленки.

Ширина внешней полоски электрокартона (рис. 51) равна периметру паза, внутренней — больше на 10–20 мм, чтобы края ее

выходили из шлица паза. После укладки проводников секций в паз до ее заклинивания лишние части краев полоски обрезаются.

Длина внутренней полоски делается больше длины магнитопровода на 4–6 мм на сторону, внешней — больше до 16–20 мм в зависимости от мощности машины.

Длина и ширина полоски лакоткани или изоляционной пленки та же, что и у внутренней полоски электрокартона.

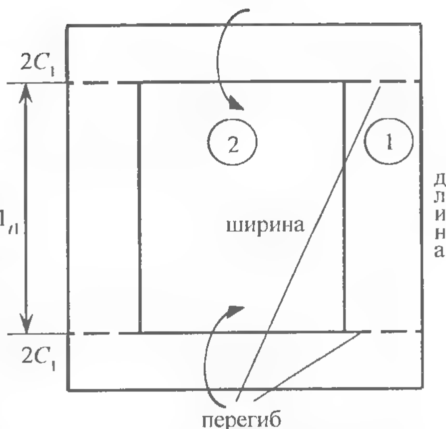



*Рис. 51.* Заготовки пазовой коробки: *1, 2* — внешняя и внутренняя полоски пленкоэлектрокартона

Сборка изоляционной коробки выполняется наложением указанных полосок электрокартона друг на друга с полоской лакоткани или изоляционной пленки между ними. При пленкоэлектрокартоне они накладываются пленкой внутрь. Затем полоска по длине подворачивается вокруг внешней полоски (по линиям перегиба), что укрепляет пазовую изоляцию на торцах магнитопровода за счет образовавшихся с двух сторон манжет (рис. 52).

После сборки пазовой коробочки желательно для получения нужной формы провести ее обжимку на специальном приспособлении.

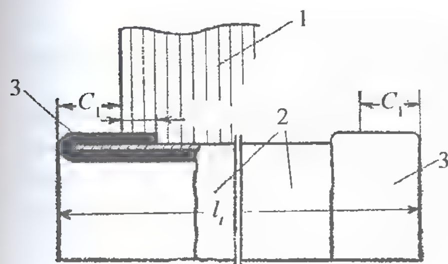



*Рис. 52.* Пазовая изоляция на торцах магнитопровода: *1* — магнитопровод; *2* —коробочка; *3* — манжета

Готовые изоляционные пазовые коробочки помещаются в пазы магнитопровода электрической машины с помощью оправки для загибания (рис. 53). Затем изготавливаются другие детали пазовой изоляции: изоляция под клин, при выполнении двухслойных обмоток – межслоевая изоляция и пр.

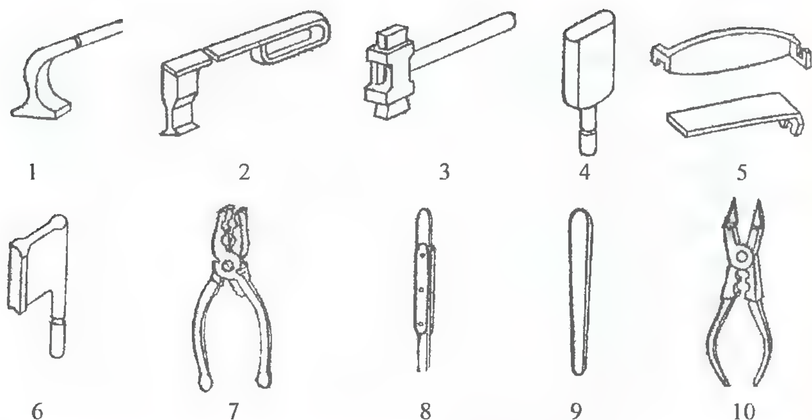



Рис. 53. Инструмент обмотчика электрических машин: *1* — стальная выколотка для монтажа пазовых клиньев; *2* — стальной топорик для монтажа пазовых клиньев; *3* — молоток с деревянными рабочими частями для монтажа обмоток (может быть полностью деревянным); *4* — стальной молоток для работы внутри расточки статора; *5* — ключи для гибки роторных стержней; *6* — стальная оправка для осадки проводов на дно паза; *7* — плоскогубцы универсальные; *8* — стальная оправка с деревянной ручкой для загибания изоляционных гильз; *9* — стальная пластина для формовки лобовых частей обмотки; *10* — круглогубцы универсальные

Клинья, закрепляющие секции обмоток в пазах, изготавливаются на станках из твердых пород деревьев (дуб, бук и т.п.) или из пластмасс. Для изготовления всех деталей пазовой изоляции *обмотчик должен знать* электротехнические материалы, из которых они выполняются, и их размеры.

## 12.2. Намотка (изготовление) катушечных групп

Фазные катушки всыпных обмоток изготавливаются одним или несколькими параллельными обмоточными проводами одной марки и сечения (если число параллельных сечений более единицы, т.е. при $a' > 1$). Катушки секций наматываются на специальные шаблоны, установленные на станках (рис. 54, *а*).

Конструкций шаблонов к настоящему времени разработано много: различного вида универсальные, ступенчатые, шарнирные и др. Одни из них дают возможность получить секции лишь с нуж-

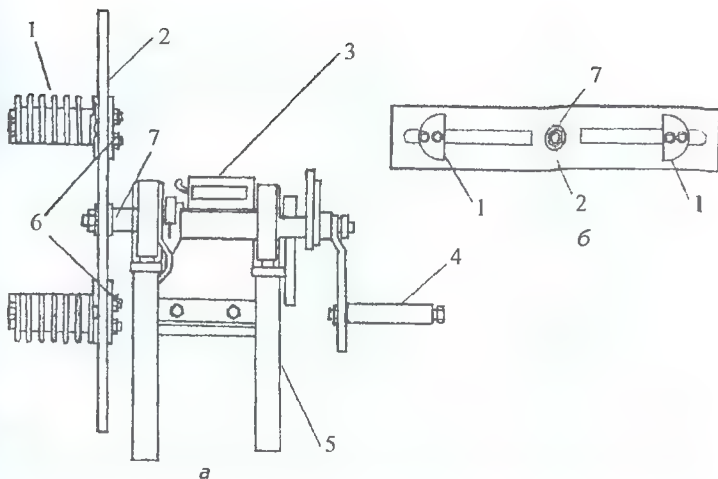



*Рис. 54.* Ручной станок (*а*) для намотки катушек на универсальном шаблоне (*б*): *1* — колодки шаблона; *2* — коромысло (плита) шаблона; *3* — счетчик числа оборотов; *4* — ручка; *5* — рама станка; *6* — шпильки с гайками крепления; *7* — вал

ной длиной витка $l_в$ (рис. 54, *б*). Другие обеспечивают не только размеры, но и форму секции (рис. 55). Третьи шаблоны создают возможность легкого отделения секций катушечной группы друг от друга и легкого снятия их после намотки, например, на шарнирном шаблоне (рис. 56) и т.п.

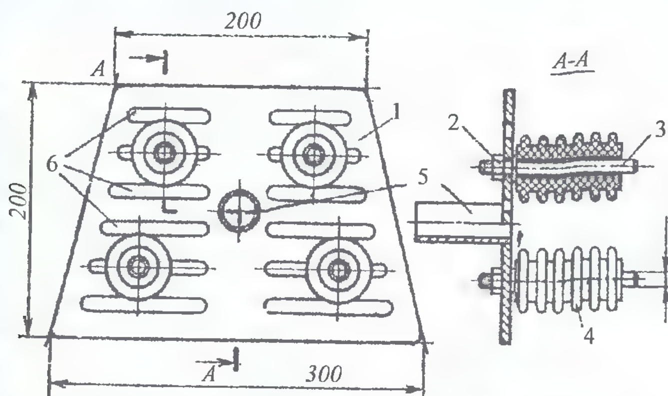



*Рис. 55.* Шаблон для намотки секций с получением требуемой формы: *1* — плита шаблона (коромысло); *2* — гайка; *3* — шпилька; *4* — колодки; *5* — вал шаблона; *6* — прорези в плите

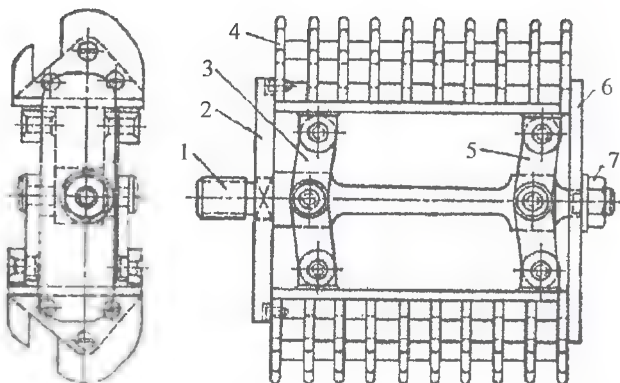



*Рис. 56.* Шарнирный шаблон для намотки катушечных групп: *1* — вал шаблона; *2* — опорная планка; *3* — поворотная планка; *4* — колодки шаблона; *5* — поворотная планка; *6* — съемная планка; *7* — зажимная гайка на валу

Наиболее распространен в производстве универсальный шаблон (рис. 54, *б*). Он состоит из металлической или деревянной плиты с двумя прорезями, расположенными симметрично от вала. В прорезях перемещаются колодки, которые закрепляются на коромысле в нужных местах гайками крепления на шпильках (рис. 54, *а*).

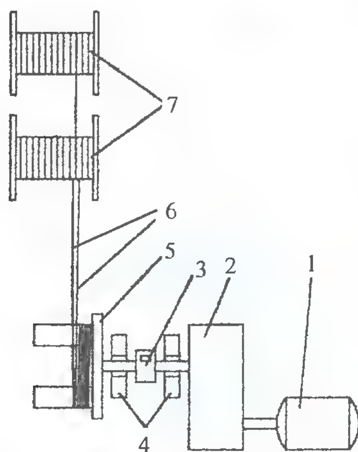



*Рис. 57.* Принципиальная схема намоточного станка: *1* — электродвигатель; *2* — редуктор; *3* — счетчик; *4* — подшипники; *5* — шаблон ; *6* — обмоточный провод; *7* — катушки

Также много конструкций и намоточных станков, однако принципиальных различий в работе у них нет. Все они имеют шаблон, который вращается от электродвигателя через редуктор. Число оборотов шаблона, равное числу витков в секции, фиксируется счетчиком (рис. 57).

Все секции фазной катушки всыпных обмоток наматываются одним куском провода с катушек. После намотки нужного числа витков в секцию станок останавливается. Уложенные витки фиксируются (связываются) обрезками обмоточного провода, шнура или ленты.

*Для изготовления катушечных групп обмотчик должен знать* марку и сечение обмоточного провода, его массу, число параллельных сечений, число витков в секции, число секций в катушечной группе и число катушечных групп в обмотке машины.

## 12.3. Изготовление обмотки асинхронного двигателя

Оно включает ряд взаимосвязанных работ.

*Укладка катушечных групп в пазы.* Для выполнения этой ответственной операции технологического процесса обмотчику должны быть даны следующие необходимые сведения: тип обмотки, шаг, порядок размещения катушечных групп.

Для укладки секций катушечных групп в пазы магнитопровода обмотчик должен располагать необходимым набором специальных инструментов (рис. 53). Желательно также, чтобы рабочее место было оборудовано поворотным столом, устройство которого приведено на рис. 58.

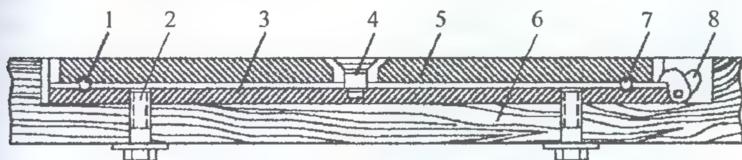



*Рис. 58.* Поворотный стол для укладки обмоток

Он состоит из верхнего поворотного диска *5*, нижнего неподвижного диска 3, прикрепленного к верстаку *6* с помощью болтов *2*. В дисках проточены кольцевые канавки, в которые заложены шарики *1*, *7*. Диск *5* вращается вокруг оси *4*. Фиксация положения его выполняется защелкой 8.

Хорошо зарекомендованы на производстве приспособления, показанные на рис. 59, *а*, *б*.

После установки статора электромашины *2* на столе (рис. 60) или закреплении его в приспособлении для поворота (рис. 59) активные стороны первой катушечной группы, подлежащей укладке, располагают над пазами *1*. Проталкивают через шлиц в изолированный паз активные проводники одной стороны секции *3*.

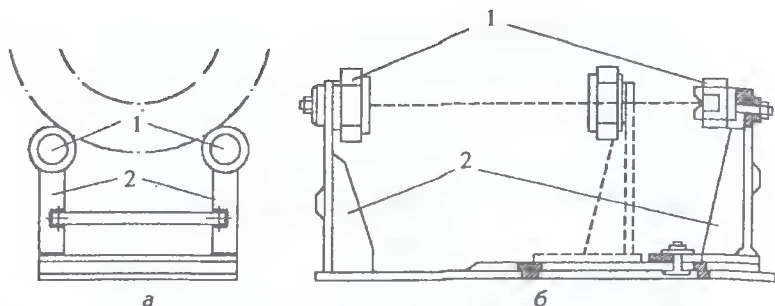


*Рис. 59.* Принципиальные схемы приспособлений для поворота статора (*а*) или ротора (*б*) вокруг горизонтальной оси: *1* – подшипники; *2* – станина

Необходимо следить, чтобы провода располагались в нем строго параллельно друг другу, перекрещивание недопустимо. В случае необходимости пользуются оправкой. При выполнении однослойной обмотки через шаг также укладывается вторая сторона секции *4*. Затем аналогично размещаются все остальные секции группы. Поворачивая корпус статора, укладывают активные стороны всех других катушечных групп.

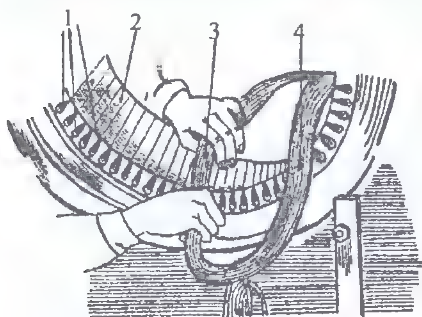


*Рис. 60.* Укладка секции в пазы магнитопровода

Заклинивание (закрепление в пазах) активных сторон секций может производится как сразу после укладки одной стороны, так и после укладки всех сторон секций. Перед заклиниванием в расточке статора над пазами срезаются излишки полосок пазовых коробочек (рис. 51) и оставшиеся концы подворачивают в пазы. Сверху на них накладывается изоляция под клин. С торцов пазов молотком забиваются клинья.

При выполнении двухслойной обмотки сначала укладывают нижние стороны первых секций катушечных групп. Вторые стороны, входящие в шаг, не укладывают, а только отгибают и связывают, для того чтобы не мешали работе.

Затем все последующие катушечные группы укладывают в пазы нижними и верхними сторонами с заклиниванием. При этом перед закладкой проводов верхних сторон секций предварительно расправляют в пазах активные проводники нижних сторон. Производят их уплотнение с помощью оправки (рис. 53). Устанавливают межслойную изоляцию. Лобовым частям с помощью стальной пластины придают нужную форму. Всю указанную работу проводят аккуратно, следя за целостностью изоляции и отсутствием перекрещивания проводов.

Перед укладкой катушечных групп последнего шага незаложенные в пазы верхние стороны секций первых катушечных групп, отогнутых вверх, развязывают и после этого последовательно, друг за другом укладывают сверху.

Выполнение обмотки завершается установкой изоляционных прокладок в ее лобовых частях. Для однослойной — между катушечными группами под первые секции. Для двухслойных, с укороченным шагом, прокладки устанавливаются между всеми секциями.

*Сварка, пайка, лужение.* Обмотка представляет собой соответствующим образом соединенные фазные катушки. Такие соединения выполняются или сваркой, или пайкой.

*Сваркой* называют технологический процесс получения неразъемного соединения путем плавления материала деталей в месте соединения. Достоинство сварки медных проводов — хороший электрический контакт при высокой экономичности. Недостаток — плохая механическая прочность соединения.

*Пайкой* называют технологический процесс получения неразъемного соединение путем плавления в месте соединения специального материала – припоя. Достоинство такого соединения заключается в создании требуемой механической прочности при качественном электрическом контакте.

*Лужение* — технологический процесс покрытия материалов слоем мягкого припоя. Оно производится для высококачественного соединения при пайке, защиты деталей от окисления кислородом воздуха, получения большей площади соприкосновения токо-

ведущих деталей при их холодном сращивании. В последнем случае (например, при болтовом соединении шин) припой, как мягкий материал, в месте соединения при сжатии деформируется и создает большую площадь соприкосновения, а это снижает плотность тока, следовательно, уменьшает потери электроэнергии, ограничивает нагрев деталей в местах соединения.

При пайке, сварке и лужении используются вспомогательные материалы — *флюсы*. Эти вещества обладают повышенной способностью хорошо растворять окислы металлов, пониженной температурой плавления и, так как они имеют меньшую плотность, способностью всплывать на поверхность расплава, создавая на нем плотную пленку, защищающую расплав от окисления. Кроме того, флюсы улучшают растекаемость припоя. Выполнение пайки, сварки и лужения без флюса приводит к соединениям с плохой механической прочностью и высокой хрупкостью. В электротехнике в качестве флюсов используют для мягких припоев канифоль или составы на ее основе; для твердых — буру и ее смеси с другими веществами.

Пайка и лужение выполняются с помощью специальных нагревательных приборов — паяльников, которые делятся на две большие группы.

*Паяльники с периодическим нагревом* представляют собой медные или бронзовые молоточки с металлическими рукоятками. Основное достоинство их в том, что для нагрева можно использовать разнообразные энергоносители. Основной недостаток – быстрое остывание, следовательно, есть необходимость в периодическом сравнительно длительном нагреве.

*Паяльники с постоянным подогревом.* По способу нагрева их целесообразно разделить на: 1) *элементные,* изготавливаются в виде медных или бронзовых стержней или молоточков, со спиральными или плоскими нагревательными элементами; 2) *дуговые*, в виде молоточков с устройством для получения электрической дуги; 3) *высокого местного сопротивления* — в виде паяльных клещей (рис. 61), состоящих из изолированной ручки *1*, выключателя *2*, устройства для зажима угольных электродов *4*, контактных прово-

дов *3*, подключаемых к вторичной обмотке трансформатора с пониженным напряжением.

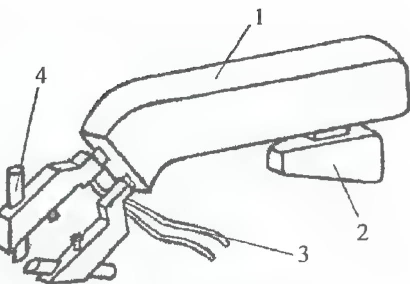


*Рис. 61.* Клещи для пайки твердыми припоями

Достоинство второй группы паяльников в том, что они не требуют дополнительного времени на нагрев.

Для пайки мягкими припоями используются все названные типы паяльников, для пайки твердыми припоями чаще применяются паяльные клещи.

В ремонтной практике концы проводов катушечных групп всыпных обмоток обычно соединяют сваркой (рис. 62).

Последовательность операций следующая: с концов соединяемых проводов (7) на длину 25–30 мм снимается изоляция. Проводится зачистка жил. На один из проводов надевается изоляционная трубка *6* (иногда в целях усиления изоляции трубки надеваются на оба соединяемых провода); после этого оголенные концы скручиваются на 20–25 мм и свариваются.

Для получения электрической дуги от вторичной обмотки трансформатора *3* проводом *4*, через выключатель *5*, подключается медный электрод *10*, который закрепляется у основания скрутки *9*. От той же обмотки *3* проводом *4* подключается угольный электрод *1*, закрепленный в держателе *2*. Угольный электрод прижимают к торцу скрутки и включают выключатель, что создает замкнутую электрическую цепь. Затем угольным электродом создается небольшой разрыв, что вызывает между скруткой и электродом появление дуги.

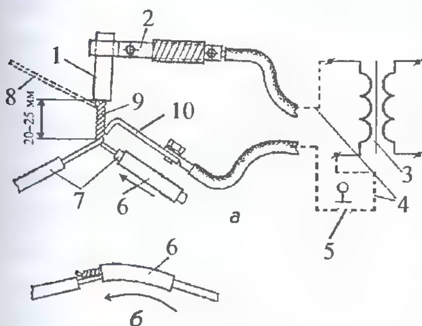


*Рис. 62.* Сварка (*а*) и изолировка (*б*) соединений проводов

В соответствии с требованиями техники безопасности питание сварочного устройства вы-

полняется пониженным напряжением. При сварке проводов диаметром до 1 мм (включительно) напряжение не должно превышать 12 В, при диаметре проводов более 1 мм — 36 В. Также проводится сварка всех остальных соединений обмотки. К концам ее привариваются выводы из многожильных гибких проводов.

Сварка дает очень хороший электрический контакт без использования флюса, однако механическая прочность соединения оставляет желать лучшего. Вот почему после сварки длина участка скрутки должна остаться не менее 15–20 мм.

Затем проводится зачистка оплавленных мест, пригиб скруток к одному из проводов у всех соединений обмотки и перемещение изоляционных трубок 6 по стрелке рис. 62, *б* до полного закрытия оголенных мест.

При необходимости получения соединения с повышенной механической прочностью аналогично сварке может проводиться пайка мягкими и твердыми припоями. В этом случае угольный электрод не отрывают от скрутки. Нагрев ее обеспечивается за счет местного нагрева, как и у паяльных клещей. При достижении нужной температуры к месту скрутки припой подается в виде палочки *8*, на рис. 62, *а* он показан пунктиром.

Для всех типов паяльников питание, так же как и при сварке, должно быть на пониженном напряжении 6–36 В. После пайки или сварки обмоток проводится предварительная правка (рихтовка) их лобовых частей с помощью молотка с деревянными рабочими частями *3* (рис. 53) и стальной пластины *9*.

## 12.4. Бандажировка обмоток электрических машин

*Бандажировкой* называют технологический процесс повышения механической прочности обмоток путем наложения бандажей. Последние представляют собой один или большее количество витков гибкого изделия (шнура, провода, ленты).

Расположение бандажа в электрической машине должно быть таким, чтобы не затруднять вентиляции обмоток. В зависимости от используемых материалов бандажи делятся на мягкие и жесткие.

*Мягкие бандажи* изготавливаются из лент, шнуров и чулок. Их накладывают на лобовые части статорных и роторных обмоток. На статорных обмотках бандажом скрепляют лобовые части рядом лежащих секций, наматывая ленту через полукольца их вылетов. У роторов бандажи накладываются на полукольца лобовых частей обмоток из мягких секций, причем ленты укладываются в полунахлест, шнуры и чулки — плотно, виток к витку.

Завершается бандажировка окончательной рихтовкой лобовых частей перед пропиткой обмоток электрических машин.

*Жесткие бандажи* изготавливаются либо из луженых бандажных проволок (стальных или бронзовых, причем стальные могут быть магнитными или немагнитными), либо из специальных стеклолент марок ЛСБ-В и ЛСБ-F повышенной прочности, пропитанных термореактивным лаком.

Высокая механическая прочность таких лент ($9\text{–}10^7$ Па) обеспечивается расположением нитей (в одном направлении вдоль ленты). Вместе с тем их прочность приблизительно в два раза меньше, чем у металлических проволок. Несмотря на сказанное, использование ленточных бандажей повышает надежность работы электромашин, так как проволочные бандажи могут при определенных условиях распаиваться вихревыми токами с размоткой и повреждением активной стали. Повышение же площади сечения стекловолокнистого бандажа в два раза полностью компенсирует недостаток прочности. Такое увеличение возможно, ибо бандажи из стеклолент не требуют дополнительной изоляции, а следовательно, они имеют резерв для размещения большего числа слоев лент. Стеклобандажи имеют хорошую монолитность, сцепление с обмоткой и высокую электрическую прочность до 16 МВ/м. Кроме того, они дешевле проволочных. Накладываются бандажи до пропитки и сушки обмоток электромашин.

*Изготовление жесткого бандажа.* Жесткие бандажи накладываются на лобовую и пазовую части обмоток роторов электрических машин с большими маховыми массами, а также при повышенной скорости вращения, так как на обмотки в этих случаях во время работы воздействуют большие центробежные силы.

Для крепления пазовой части обмоток на магнитопроводах роторов предусматриваются специальные кольцевые канавки. Они получаются за счет уменьшения диаметра, ряда листов электротехнической стали сердечника. Наружный диаметр жесткого бандажа на пазовой части обмотки не должен превышать диаметра ротора, а на лобовой части он должен быть меньше на 3–4 мм.

Все данные нового проволочного бандажа (материал проволоки, его диаметр, число витков, материалы и конструкции изоляции) берутся по старому бандажу. При отсутствии проволоки нужного диаметра допускается использование проволоки другого диаметра, но в этом случае число витков бандажа должно быть уточнено по выражению

$$W_{\text{Н}} = W_C \frac{d_C^2}{d_{\text{Н}}^2},$$

где $W_{\text{Н}}$ — число витков нового бандажа, шт., $W_C$ — число витков старого бандажа, шт., $d_C$ — диаметр старой бандажной проволоки, мм, $d_{\text{Н}}$ — диаметр новой бандажной проволоки, мм.

Таким образом, число витков нового бандажа $W_{\text{Н}}$ меняется обратно пропорционально сечению бандажных проволок ($\pi$ и 4 сокращаются).

В том случае, если старый бандаж не сохранился, диаметр стальной бандажной проволоки ($d_{\text{Н}}$) берется по наружному диаметру магнитопровода ротора ($D$).

Зависимость диаметра бандажной проволоки от диаметра ротора, мм: до 100 — 0,6; 101–200 — 0,8; 201–400 — 1,0; 401–600 — 1,2; 601–1000 — 1,5; более 1000 — 2,0.

Количество витков в этом случае может быть определено по формуле

$$W_{\text{Н}} = 1{,}63 \frac{m \cdot D_0 \cdot g}{{d_{\text{Н}}}^2 \cdot (R_Z - \sigma)} \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2,$$

$m$ — масса обмотки с изоляцией, кг; $D_0$ — средний диаметр окружности проходящей по центрам пазов магнитопровода ротора, м; $d_{\text{Н}}$ — диаметр новой бандажной проволоки, мм; $n$ — частота вра-

щения магнитного поля статора, мин$^{-1}$; $R_Z$ — допустимое напряжение на растяжение в бандаже, МПа (для стальной проволоки можно принять 300–350 МПа, для бронзовой 180 – 200 МПа); σ — напряжение в бандаже от центробежной силы, МПа; $g$ — коэффициент нормального ускорения, $g = 9{,}81$ м/с$^2$:

$$\sigma = K_\delta \cdot D_\text{Н}^2 \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot 10^3,$$

где $K_\delta$ — коэффициент, для стальной проволоки — 0,32 (для бронзовой 0,35); $D_\text{Н}$ — диаметр бандажа, м.

Бандаж должен наматываться одним куском проволоки (без паек) длиной $L$ (м), которая находится по выражению

$$L = \pi D \cdot W_\text{Н} + (4 - 5),$$

где $D$ — наружный диаметр ротора, м, $W_\text{Н}$ — число витков проволоки нового бандажа, шт.

Элементы однослойного бандажа приведены на рис. 63.

Изоляцию под бандаж выбирают по справочнику в зависимости от класса нагревостойкости электрических машин. Например, для класса $A$ под бандажное кольцо укладывают: два слоя вполнахлеста стеклолакоткани ЛСЭ 0,17–0,2 мм и поверх нее один слой вполнахлеста хлопчатобумажной ленты; для классов $E$ и $B$ — то же, но вместо хлопчатобумажной ленты накладывается один слой вполнахлеста стеклоленты (0,15 мм). Ширина изоляции должна быть на 10–15 мм больше ширины бандажа.

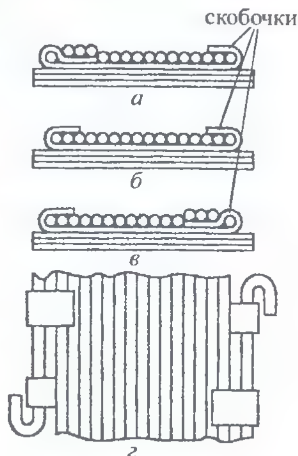


Рис. 63. Устройство однослойного бандажа

Наложение бандажа может выполняться на специальном бандажировочном или токарном станке со специальным приспособлением (рис. 64), с натяжением $P$, которое зависит от диаметра проволоки $d_\text{Н}$.

Зависимость натяжения (δН) бандажной проволоки от ее диаметра, мм: 0,6 — 300–400; 0,8 — 400–500; 1,0 — 500–600; 1,2 — 1000–1200; 2,0 — 1800–2000.

Для крепления бандажа при его изготовлении из луженой жести нарезаются промежуточные скобочки (рис. 63, *б*) толщиной 0,25–0,5 мм, шириной 8–15 мм (в зависимости от диаметра проволоки), длиной — в зависимости от ширины бандажа, кончики должны заворачиваться не менее чем на три витка с обеих сторон, однако не более чем 10 мм на сторону. Кроме того, из того же материала готовятся две замковые скобы для крепления крайних витков — начала (рис. 63, *а*) и конца (рис. 63, *в*) бандажа. Размеры этих скоб: ширина — 10–15 мм, длина должна обеспечивать загиб вокруг первого витка и подворот под два, три рядом лежащих витка.

Порядок наложения проволочного бандажа (рис. 64), роторной обмотки на бандажировочном или токарном станке:

- на отрихтованную (осаженную) поверхность лобовой части обмотки или в кольцевую канавку пазовой части укладывают изоляцию и закрепляют лентой. На лобовых частях бандажи наматываются, начиная от магнитопровода;
- конец бандажной проволоки от катушки пропускают через натяжное устройство, подвижный ролик, который связан с динамометром, и подают к ротору. Накладывают на него первый виток, который закрепляют закруткой. Затем вразбежку, без натяга, укладывают еще 2–4 витка, а затем делается первый виток бандажа с требуемым натягом — $P$. Под этот виток при его выполнении укладывают скобочки: замковые — на расстоянии 10–30 мм друг от друга, промежуточные — через 150–200 мм по периметру ротора;
- вокруг первого витка загибают замковую скобку начала бандажа (рис. 63, *а*), накладывают плотно друг к другу нужное число витков проволоки ($W_H$), при этом за 3–4 витка до завершения бандажа загибается и подворачивается под указанные витки замковая скоба (рис. 63, *в*) конца бандажа;
- не снимая натяжения, пропайкой проволок закрепляют витки у замковых скобок. После этого снимают натяжение, отрезают-

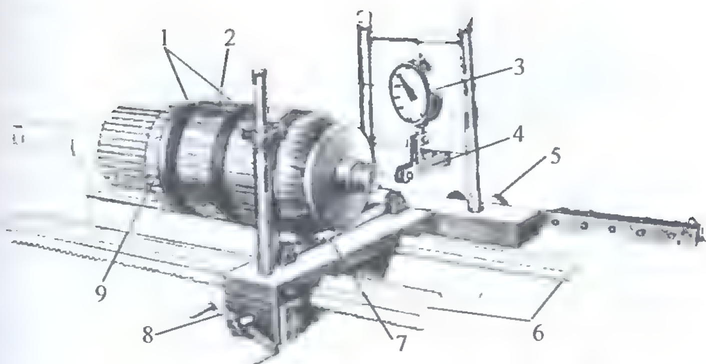



*Рис 64.* Токарный станок с приспособлением для наложения бандажа: *1* — бандаж; *2* — кольцевая канавка пазовой части обмотки; *3* — динамометр; *4* — подвижный ролик; *5* — натяжное устройство; *6* — параллели токарного станка; *7* — бандажная проволока; *8* — каретка; *9* — ротор

ся излишки бандажной проволоки. Концы первого и последнего витков загибают на замковых скобках (рис. 63, *г*) (вид на бандаж сверху);

- загибают кончики промежуточных скобочек по всему бандажу и пропаивают целиком весь бандаж мягким припоем ПОС-30 или ПОС-40. Качественно выполненный бандаж при легком простукивании молотком издает чистый, звонкий звук;
- проводится пропитка и сушка обмотки.

В мелких мастерских бандажи часто накладываются на козлах по способу «петли» с тарированным грузом (рис. 65). Масса груза определяется по формуле, кг:

$$Q = \frac{P}{g}\sqrt{4 - \frac{D-d}{l}},$$

где $P$ — натяжение проволоки, Н; $D$ — диаметр ротора, м; $d$ — диаметр ролика подвеса груза, м; $l$ — расстояние между осями ротора и блока подвеса груза, м; $g$ — ускорение, м/с$^2$ ($\approx 9{,}81$).

Намотка бандажа на козлах выполняется в следующем порядке:

- после осадки лобовой части обмотки и наложения изоляции закрепляется конец подготовленного куска проволоки и наматывается нужное число витков, вращая ротор рукой. Конечный виток

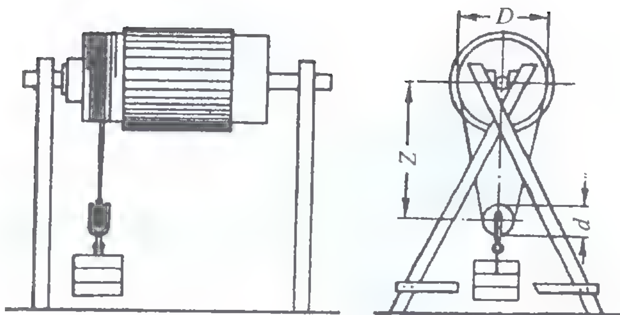



*Рис. 65.* Приспособление для намотки бандажа

делают увеличенным так, чтобы можно было образовать достаточную петлю для помещения блока;

- закрепляют второй конец. На блок вешают груз $Q$, укладывают скобки;
- рукой вращают ротор в обратную сторону, укладывая витки плотно друг к другу. Такую перемотку проволоки для получения нужного качества бандажа делают 3–4 раза.

Во всем остальном выполнение проволочного бандажа ничем не отличается от укладки на станках. Бандажи из стеклолент также наматываются на специальных или токарных станках с приспособлениями. В принципе наложение стеклолент очень похоже на рассмотренное. При термической обработке обмоток, связанных с их пропиткой и сушкой, пропиточная масса бандажировочных лент переходит в твердое состояние и образует на обмотках монолитные кольца.

## 12.5. Пропитка и сушка обмоток

Пропитка и сушка обмоток производятся на специальных участках, отделенных от обмоточных капитальной стеной с пожаробезопасными дверями. Пропиточный участок оборудуется приточно-вытяжной вентиляцией, подъемно-транспортными средствами, емкостями для лаков и растворителей, трубопроводами, специальным оборудованием для пропитки (баками, автоклавами, спецуста-

новками и пр.). Сушильный участок — вентиляцией, транспортом, шкафами, печами и другими устройствами.

Перечень конкретного оборудования зависит от способов пропитки и методов сушки. Пропитка относится к наиболее ответственным операциям при ремонте электрических машин, так как от нее во многом зависит износ изоляции. Под *износом* в данном случае понимается понижение всех показателей изоляции (ее электрических, механических и физико-химических характеристик).

В большинстве случаев она проводится *в три этапа*: 1 — предварительная сушка; 2 — пропитка; 3 — завершающая (окончательная) сушка (рис. 66).

Сушка в основном проводится при повышенной температуре. При этом она зависит от конструкции обмоток, классов изоляции, способов сушки, конструкций сушильных установок, марок пропиточных лаков и их растворителей.

*1-й этап — предварительная сушка* — проводится для удаления влаги из пор и капилляров изоляции и, следовательно, более глубо-

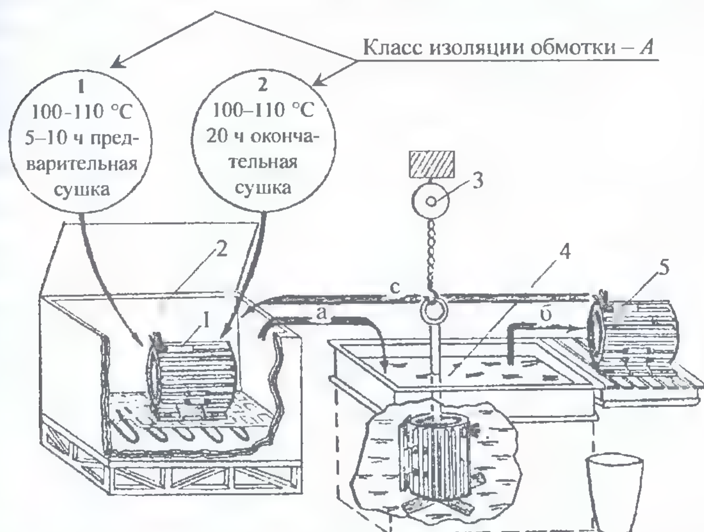



*Рис. 66.* Пропитка (способом погружения) и сушка обмоток электрических машин: *1* — электромашина с обмоткой, подлежащей пропитке; *2* — сушильная камера; *3* — электроталь; *4* — пропиточная ванна с лаком; *5* — место отстоя, для стекания излишков лака; а, б, с — порядок проведения операций сушки и пропитки

кого проникновения в них лака. Температура сушки — 90–110 °С. Окончание сушки определяется экспериментально с помощью мегомметра. Последние два, три показания, снятие через 45–60 мин, не должны существенно изменять сопротивления обмотки. В среднем такая сушка длится в течение 5–10 ч в зависимости от конструкции обмотки, класса изоляции, марки лака и растворителя.

*2-й этап — пропитка* — это технологический процесс замещения воздуха во всех пустотах изоляции обмоток лаком.

Задача пропитки — повышение изоляционных показателей обмотки: во-первых, электрической прочности, во-вторых, класса нагревостойкости, в-третьих, механической прочности, в-четвертых, влаго- и химостойкости. Кроме того, пропитка увеличивает теплопроводность и повышает короностойкость. Улучшаются также и другие характеристики.

***Влияние пропитки на характеристики изоляции.*** Рассмотрим подробнее, как действует пропитка на указанные показатели.

*Электрическая прочность* непропитанной изоляции определяется пробивной напряженностью воздуха ($E_{\text{ПР}}$ = 3,2 МВ/м); у пропитанной, где воздух в порах и капиллярах вытеснен лаком, она определяется пробивной напряженностью электроизоляционных лаковых пленок, которые намного выше (например, для ФЛ-98 или ГФ-95 — $E_{\text{ПР}}$ = 70 МВ/м). Это дает возможность резко сократить толщину изоляции в электрических машинах и повысить надежность их работы в эксплуатации.

*Класс нагревостойкости.* Непропитанные волокнистые органические изоляционные материалы (хлопчатобумажные, шелковые ткани и ленты, бумаги, картон и пр.) относятся к классу *Y*, т.е. наибольшая допустимая рабочая температура их равна 90 °С, после пропитки, в зависимости от лака, они относятся уже к классу *A* (105 °С) и даже *E* (120 °С). Такое явление объясняется тем, что термически более устойчивая лаковая пленка при пропитке покрывает волокна и ограничивает воздействие на них кислорода воздуха, сокращая окислительный процесс. Это дает возможность увеличить номинальный ток электромашин, а значит и номинальную мощность электромашин.

*Механическая прочность* обмоток при пропитке значительно возрастает за счет склеивания витков в единый монолит. Такая цементация ограничивает износ изоляции, так как ликвидирует явление трения при перемещении витков относительно друг друга под воздействием вибрации машины, переменного электромагнитного поля, от тепловых расширений и повышенных динамических усилий при пуске.

*Влагостойкость* обмоток возрастает, поскольку после пропитки поры и капилляры изоляции заполнены лаком, что ограничивает проникновение туда влаги из окружающей среды (сокращается гигроскопичность). Также уменьшается и площадь поверхности обмотки для соприкосновения с влагой. Все это повышает электрическую прочность изоляции и другие ее диэлектрические показатели.

*Химостойкость* обмоток повышается за счет сокращения площади соприкосновения ее с агрессивной средой, снижения скорости проникновения в обмотку химически активных реагентов (аммиака, сероводорода, углекислого газа и др.), которые разрушающе действуют на структуру изоляции и резко увеличивают ее старение. Кроме того, лаковые пленки более устойчивы к воздействию химреагентов.

*Теплопроводность* обмоток увеличивается за счет удаления из всех ее пустот воздуха, являющихся плохим проводником тепла. Благодаря пропитке теплопроводность значительно увеличивается, за счет чего улучшается охлаждение обмоток электромашин, понижается температура старения изоляции. Это позволяет дополнительно повысить величину тока, а значит и мощность машин.

*Короностойкостью* называется устойчивость изоляции к разрушающему воздействию от бомбардировки заряженными частицами. Они образуются в результате ионизации воздуха в электрическом поле. При пропитке удаление воздуха из всех пустот обмотки значительно сокращает количество заряженных частиц, за счет этого и повышается короностойкость.

***Способы пропитки.*** Пропитка обмоток при ремонте выполняется следующими способами: нанесением лака кистью, поливом

струей лака, струйным или капельным, погружением в лак, под давлением, под вакуумом.

Выбор способа пропитки зависит от вида ремонта обмоток (полного или частичного), объема ремфонда, габаритов и условий работы электрических машин, размера ремонтного предприятия, экономических соображений.

Для глубокого проникновения лака в пустоты изоляции при любом способе пропитки обмотка должна быть в нагретом состоянии до температуры 60–65 °С. В противном случае, быстро остывая, лак теряет жидкотекучесть и пропитка получается весьма поверхностной. Отрицательно отражается на пропитке и превышение указанной температуры обмотки, так как лак быстро теряет растворитель и образует на ее поверхности пленку, которая препятствует поступлению следующих порций лака в поры изоляции. Поэтому при пропитке подогревается и пропиточный лак до температуры около 60°С.

***Пропитка нанесением лака кистью*** делается путем погружения кисти в емкость с лаком, а затем касанием ее обмотки в месте пропитки.

*Достоинства* способа*: простота, не требует сложного оборудования, сравнительно небольшой расход лака и растворителя, не требует значительного расхода электроэнергии. *Недостатки:* малая глубина проникновения лака в изоляцию, неравномерность толщины лаковой пленки и крайне малая производительность труда.

Способ широко применяется в основном при частичном ремонте обмоток электромашин, особенно в эксплуатации.

***Пропитка поливом струей лака.*** Магнитопровод с обмоткой электрической машины устанавливается на отбортованный лист железа одной лобовой частью вертикально вверх, либо с наклоном под углом 15–30°. Лист имеет слив в сборную емкость. Разогретый лак забирается ковшом и выливается на лобовые части пропитываемых обмоток.

---

* Здесь и далее приводятся лишь основные достоинства и недостатки способов.

*Достоинства:* простота, несложное оборудование, возможность пропитки обмоток электрических машин любых габаритов, малый расход энергии, сравнительно высокая производительность; недостатки — неравномерность толщины лаковой пленки, невысокая глубина пропитки, большой расход лака и его растворителя.

Способ получил довольно широкое применение, особенно при пропитке крупногабаритных машин в малых и средних ремонтных мастерских.

***Струйный или капельный*** способы пропитки более современны, но по сути они являются разновидностями рассмотренного способа — полива струей лака. Отличие только в том, что на специальных стендах магнитопроводы с обмотками *4* (рис. 67), установленные под углом 15–20° к горизонту, приводятся во вращение с частотой 15–20 об/мин (т.е. очень медленное). От емкости (*1*), по лаководам (*2*), на лобовые части, находящиеся выше, подается каплями или

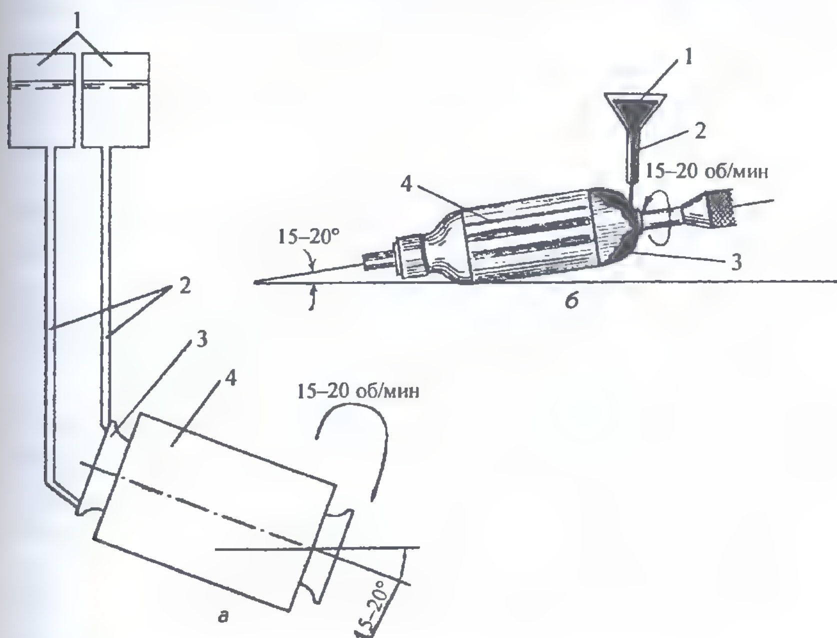



*Рис. 67.* Капельный способ пропитки обмоток статора (*а*), ротора (*б*)

тонкой струей лак или расплавленный компаунд, которые, растекаясь по обмотке, пропитывают ее.

При пропитке компаундами, в конце предварительной сушки обмотки дополнительно нагреваются до температуры 120–130°С, а компаунды — до температуры требуемой жидкотекучести.

*Достоинства* данных способов по сравнению с рассмотренными: меньший расход пропиточного материала и растворителя. *Недостатки:* требуют относительно сложного оборудования, много времени для регулировки; для машин средней и большой мощности вообще нерациональны.

В ремонтной практике способы пока не применяются, но на крупных предприятиях при большом ремфонде могут быть использованы, если собирать в достаточном объеме машины с однотипными параметрами.

***Способ пропитки погружением.*** По данному способу магнитопровод с обмоткой или детали обмоток после предварительной сушки охлаждают до температуры 60–65°С. Затем, установив их так, чтобы воздух имел возможность легкого выхода из изоляции (например, вертикально), медленно опускают в ванну с лаком. Желательно, на глубину не менее 0,2–0,4 м от уровня поверхности лака до верхней кромки лобовой части обмотки.

Некоторые конструкции ванн оборудуются нижней подачей лака, тогда пропитываемые детали опускаются в пустую ванну, которую затем медленно заполняют лаком.

Там обмотка выдерживается до полного прекращения выделения пузырьков воздуха. Практически при температуре лака 60°С это время колеблется в широких пределах (15–50 мин).

Пропитанные изделия извлекаются из ванны и устанавливаются на стеллажи для стекания излишков лака. В том случае, если воздушный зазор машины мал, следует ветошью, смоченной в растворителе, удалить лак с поверхности расточки магнитопровода. Завершающая операция — окончательная сушка.

Схема установки для пропитки способом погружения (рис. 68) состоит из подъемного стеллажа (*3*) для деталей (9), подлежащих пропитке (статор с обмотками), механической или электрической

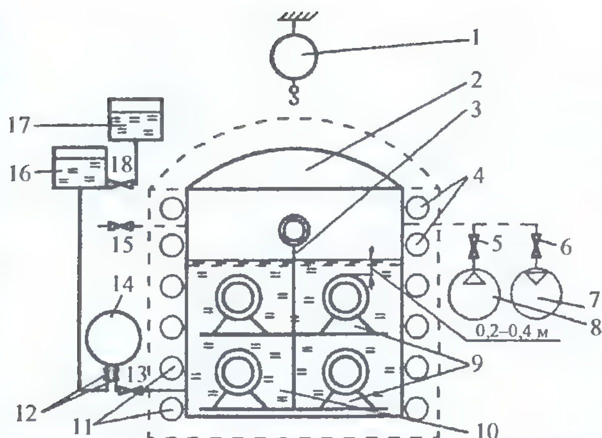



*Рис. 68.* Принципиальная схема установки для пропитки способом погружения, под давлением, под вакуумом, пунктир — дополнительное оборудование

тали (1), чаще всего на монорельсе (таль для подъема и опускания стеллажа, монорельс для перемещения на участке), ванны с лаком *(10),* с крышкой (*2*) емкости для лака (*16*) и емкости для растворителя (*17*), последние соединены с ванной трубопроводами, в которые включены вентили (*12, 13*) и насос для перекачки лака (*14*).

Для получения изоляции обмоток с повышенными качествами пропитку с сушкой повторяют несколько раз. Рациональное количество циклов зависит от условий и характера работы электромашины, конструкций обмоток, классов нагревостойкости, марок лаков. Основное заполнение пор и капилляров изоляции лаком выполняется при первой пропитке, последующие можно рассматривать как наложение покровной пленки. Время последующих пропиток колеблется в пределах 10–12 мин. После каждой из них проводится сушка.

*Достоинства* способа: экономичность, сравнительно несложное оборудование, простота технологии, глубина пропитки в целом удовлетворительная, достаточно ровная по толщине лаковая пленка, высокая производительность. *Недостатки:* относительно повышенный расход лака и растворителя. Последнее происходит

за счет испарения. Отсюда для восстановления пропиточной способности лака необходимо периодическое восполнение растворителя. При крупных габаритах машин требуются ванны большого объема, кроме того, есть сложности, связанные с переходом от одного типа изоляционного лака к другому.

Метод широко применяется на ремонтных предприятиях всех уровней.

***Пропитка под давлением*** требует крышки (*2*) у пропиточной ванны (*10*), герметически закрывающейся, а также наличия сжатого воздуха (рис. 68).

Последовательность операций пропитки. На первом этапе она выполняется так же, как и при рассмотренном способе погружения. Затем, по окончании выделения на поверхности лака в ванне (*10*) пузырьков воздуха, крышка (*2*) закрывается и в пространство под крышкой над уровнем лака через вентиль (*5*) ударом подается сжатый воздух от компрессора (*8*). Через 5–7 мин вентилем (*15*) на такое же время давление снимается, после чего операция повторяется. Рациональное количество таких циклов определяется экспериментально.

Достоинства и недостатки способа те же, что и в способе простого погружения, но пропитка более глубокая, вместе с тем имеется некоторое усложнение технологии и требуется дополнительное оборудование. Способ наиболее целесообразен на тех предприятиях, где имеется централизованное снабжение сжатым воздухом.

***Способ пропитки под вакуумом*** более прогрессивен. Он позволяет предварительную сушку выполнять при значительно меньших температурах. Это, во-первых, значительно ограничивает скорость старения изоляции, во-вторых, сокращает время сушки. Однако такой способ пропитки требует не обычной ванны (*10*) (на рис. 68 — сплошная линия), но специальной конструкции — *автоклав, — емкости с герметически закрывающейся крышкой* (*2*) и *устройством нагрева* (*4*) с теплоизоляцией (пунктир). Необходима еще вакуумная установка (*7*).

Последовательность операций: после предварительной сушки обмоток под вакуумом в автоклаве открывается вентиль *13* от ем-

кости *10*, и нагретый лак самотеком под атмосферным давлением заполняет автоклав. Так как во всех пустотах обмотки воздух отсутствует, поры и капилляры засасывают лак и заполнение их становится значительно полнее. Через несколько минут перекрывается вентиль (*6*), отключается вакуумный насос. Вентилем (*15*) под крышкой ванны снимается вакуум и насосом (*14*) лак перекачивается из ванны *10* (автоклава) в емкость *16*.

*Достоинства* способа: высокая степень заполнения всех пустот обмоток, значительно меньший расход лаков и их растворителей, чем при пропитке поливом или погружением, меньшее время на пропитку, равномерная толщина изоляционной пленки, высокая производительность, экономичность. *Недостатки:* требуется дорогостоящее технологическое оборудование; имеются трудности в обеспечении достаточной герметизации пропиточных ванн, определенная сложность технологии пропитки.

Способ достаточно широко применялся на многих крупных (и даже средних) ремонтных предприятиях. Он был вполне экономичен, несмотря на дорогостоящее оборудование, так как за счет высокого качества пропитки срок работы электрических машин увеличивался на 15–20 %.

Наиболее качественную пропитку дает способ *пропитки по тренировочному режиму.* По данному методу после пропитки обмотки под вакуумом в автоклавах под крышку на 5–7 мин подается сжатый воздух, затем на такой же промежуток давление снимается. После чего процесс повторяется 3–5 раз. Он обеспечивает пропитку на повышенную глубину изоляции, однако требует много дорогостоящего оборудования. В ремонтной практике данный способ применения пока не получил.

*Категорически запрещается проводить пропитку обмоток методом пульверизации* (в некоторых литературных источниках одно время он ошибочно рекомендовался как наиболее прогрессивный). Дело в том, что в этом случае в лаковой пленке остается много воздуха, а это резко снижает все характеристики изоляции.

При всех способах пропитки следует тщательно следить за вязкостью изоляционных лаков, так как их растворители, как прави-

ло, обладают повышенной летучестью, в результате лак густеет и теряет способность хорошо заполнять поры и капилляры обмоток. Для поддержания требуемой жидкотекучести лаков периодически в пропиточную ванну или емкость с лаком добавляют требуемые порции растворителя, масса которых определяется из выражения

$$g = G\frac{p_1}{p_2}\left(\frac{b_1}{b_2} - 1\right),$$

где $g$ — добавляемая масса растворителя, кг; $G$ — масса лака в пропиточной ванне, кг; $p_1$ — плотность лака в пропиточной ванне, кг/м$^3$; $p_2$ — плотность растворителя, кг/м$^3$; $b_1$ — содержание основы лака в пропиточной ванне (% по массе): $b_2$ — требуемое содержание основы лака в пропиточной ванне после добавки растворителя (% по массе).

***Выбор марки изоляционного лака*** зависит в первую очередь от класса нагревостойкости изоляции электромашины, ее номинального напряжения, условий работы и от экономических соображений. В настоящее время при ремонте машин для пропитки обмоток чаще всего используются следующие лаки:

- *масляно-битумные* пропиточные лаки марок БТ-980, БТ-987, БТ-988 и др. (старые марки N 447, 458). В основном они горячей (печной) сушки. Растворителями этих лаков являются уайт-спирит, скипидар, бензин, толуол, ксилол. Они дешевы, доступны, влагостойки, теплостойки, щелочестойки, частично кислотостойки, хорошо зарекомендовали себя для работы во влажной среде. *Недостатки:* имеют плохую цементирующую способность и маслостойкость, плохо высыхают (при нагревании размягчаются, могут вытекать из обмотки и разбрызгиваться при ее вращении). Все указанные растворители этих лаков токсичны, пожароопасны, разрушающе действуют на пленки большинства проводов с эмалевой изоляцией, поэтому для пропитки обмоток из эмаль-проводов применять не рекомендуется.

Масляно-битумные лаки широко используются для пропитки обмоток с волокнистой изоляцией электрических машин и аппара-

тов, класса нагревостойкости *A* и *E*, работающих в условиях повышенной влажности;

- *водоэмульсионные* пропиточные лаки марок ПФЛ 88 и 321-Т горячей сушки применяются в виде водной эмульсии, главным образом для электромашин с классом нагревостойкости *A, E* и *B*. Лак 321-Т в основе содержит тунговое масло, ПФЛ 88-пентафталевую и меламиноформальдегидную смолы. По свойствам они близки так же, как и по области применения, но последние экономичнее и менее дефицитны (тунговое масло дорого и менее доступно). Эти лаки по сравнению с масляно-битумными обладают такими достоинствами, как высокая маслостойкость и лучшая цементирующая способность. Кроме того, они не требуют для пропитки и сушки специальных помещений, отделенных от обмоточного капитальной стеной с пожаробезопасными дверями.

Водоэмульсионные лаки позволяют применять токовую сушку, а это, в первую очередь, понижает расход электроэнергии. К тому же сокращается и период сушки.

В последнее время выявлены некоторые серьезные недостатки водоэмульсионных лаков, связанных с нестабильностью характеристик их изоляционных пленок, а также ускоренным старением. Это необходимо учитывать при использовании указанных лаков;

- *масляно-алкидные* пропиточные лаки (могут использоваться как покровные и клеящие) марок Ж-92, ГФ-985, ГФ-95, ГФ-957 горячей сушки (последний ГФ-957 дает качественную пленку и при холодной сушке) обладают повышенной химостойкостью, поэтому широко применяются для пропитки электродвигателей класса *A, E, B,* работающих во влажной атмосфере, содержащей пары аммиака, углекислый газ и подобные реагенты, например, в животноводческих помещениях.

Для пропитки обмоток классов нагревостойкости *B, F* рекомендуется еще лак марки ПЭ-993; для класса *H* — КО-964. Следует отметить, что он допускает кратковременную работу электромашин при температуре 250°С.

В условиях электроремонтных мастерских использование большого разнообразия марок лаков нежелательно, поскольку это связа-

но с большими затратами времени и средств при их смене. Целесообразнее применение одного наиболее универсального пропиточного лака, отвечающего требованиям всех типов обмоточных проводов и конструкций обмоток электромашин и рекомендуемых для условий данного конкретного предприятия. Такой маркой для сельскохозяйственных электромашин является лак МП-92.

В качестве *покровных лаков*, которые накладываются поверх пропиточных пленок для их защиты от окисления, используются: у электромашин с классами изоляции *A* и *E* — серая эмаль ГФ-92-ХС холодной сушки; для класса *B* — серая эмаль ГФ-92-ГС горячей сушки, обе они влаго-дуго-маслостойкие. Широко применяется также красная эмаль марки КПД.

Для защиты лобовых частей обмоток электромашин от разрушающего воздействия окружающей среды животноводческих помещений необходима специальная покровная пленка. Ее можно создать на базе грунта ХСТ-26, эмали ХСЭ-26 и лака ХСЛ.

*3-й этап — окончательная (завершающая) сушка* — проводится для удаления из лака растворителя и формирования (запекания) изоляционной лаковой пленки. Температура сушки зависит в первую очередь от класса нагревостойкости изоляции электромашин. Продолжительность сушки, как и при предварительной, определяется экспериментально. Она может длиться до 15–20 ч при нагреве до 110–120°С. Для сокращения продолжительности сушки температуру часто поднимают, но при этом обязателен учет ускорения скорости старения изоляции. Например, для класса изоляции *A* температуру можно увеличить до 160°С, для *B* — до 180°С, но, как в первом, так и во втором случаях не более чем на 6 ч.

Графическое отображение процесса сушки ($R$, $t$, °С, $K_{АБ} = f(\tau)$) приведено на рис. 69. На нем кривой $t$ показано изменение температуры, кривой $R$ — изменение сопротивления изоляций, кривой $K_{АБ}$ — изменение коэффициента абсорбции за время сушки $\tau$ (ч). Как видно, это время делится на два периода: в первый, продолжительностью $\tau_1$, из лака удаляется растворитель, во второй $\tau_2$ протекает процесс запекания изоляционной лаковой пленки (основа лака затвердевает и пленка цементируется).

Температура должна, плавно поднимаясь, достигать установившегося значения в конце периода $\tau_1$. Такой характер ее подъема обусловлен необходимостью. Если пропитанные детали будут помещены в сушильную камеру с температурой, равной установившейся, лаковые пленки изоляции деформируются. Причина в том, что большие порции бурно испаряющегося растворителя рвут образующуюся на поверхности обмоток пленку.

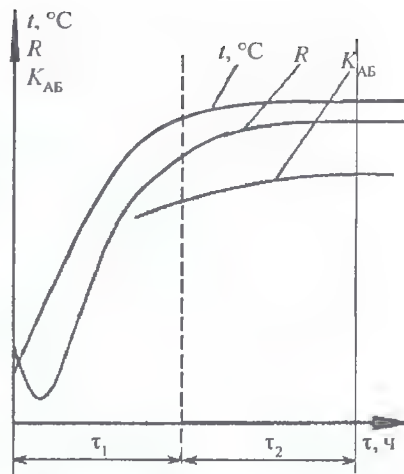



*Рис. 69.* Процесс сушки изоляции обмоток электрических машин $R$, $t$, °C, $K_{АБ} = f(\tau)$

Характерно также то, что сопротивление изоляции $R$ в начальный период сушки понижается за счет большого количества свободных зарядов испаряющегося растворителя, а затем, по мере его удаления, поднимается до установившегося значения в периоде $\tau_2$. Когда последние три замера мегомметром сопротивлений $R$ (а также коэффициента абсорбции $K_{АБ}$) не дают заметных изменений их величин, сушку заканчивают.

По окончании сушки замеряют сопротивление изоляции обмотки машины при 100°C — $R_{100}$. Если замер выполнен при другой температуре, полученное сопротивление приводят к 100°C по выражению, Ом:

$$R_{100} = R_t \cdot 10^{a\cdot(100-t)},$$

где $R_t$ — сопротивление изоляции обмотки при замеряемой температуре $t$, Ом; $t$ — температура во время замера сопротивления изоляции, °C; $a$ — температурный коэффициент сопротивления, зависящий от материала изоляции.

Полученная величина сопротивления $R_{100}$ сравнивается с допустимой. В том случае, если она не удовлетворяет нормам, проводится повторная пропитка и сушка.

**Температурные коэффициенты различных изоляционных материалов ($a$):**

| | |
|---|---|
| Бумага и лакоткань | 0,66 |
| Триацетатцеллюлозная пленка | 0,68 |
| Микалента | 0,47 |
| Стекломикалента на глифталевом лаке | 0,40 |
| Стекломикалента на кремнийорганическом лаке | 0,41 |
| Масляно-битумные и масляно-фенольные лаки | 0,092–0,096 |

***Способы сушки.*** В настоящее время сушка обмоток при ремонте электрических машин выполняется следующими методами: конвективным, токовым, индукционным и радиационным.

*Сушка конвективным способом* осуществляется горячим воздухом в сушильной камере печи. Сушильная печь (рис. 70) состоит из следующих основных узлов: сушильной камеры (*5*), в которой размещается пропитанная обмотка 4 (в статоре машины), нагревательной камеры (калорифера) *2*, где воздух нагревается до требуемой температуры, вентилятора *1*, создающего принудительную циркуляцию нагретого воздуха, экранов *3*, *6*, обеспечивающих нужное направление горячего воздуха в камере *5*, теплообменника *7* для подогрева наружного воздуха.

Конвективные сушильные печи делятся на следующие группы:

- по *конструкции* — тупиковые и проходные; тупиковые камеры имеют одну дверцу со стороны фронта, проходные — две с противоположных сторон;

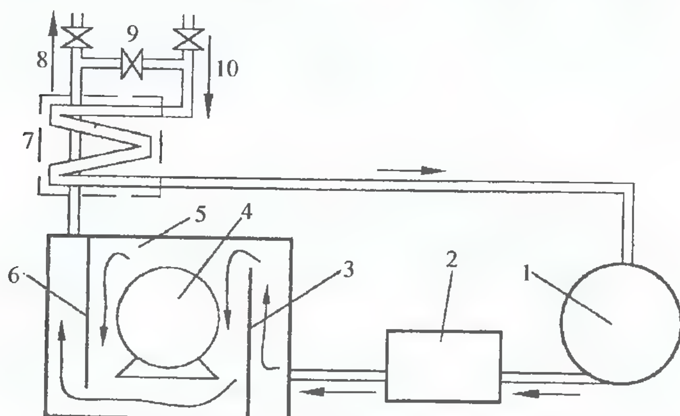



*Рис. 70.* Принципиальная схема сушильной печи

- по *энергоносителю*, используемому для нагрева воздуха, — электрические, газовые, твердого и жидкого топлива, паровые;
- по *кратности использования нагретого воздуха* — с однократной и многократной циркуляцией. Для этого сушильные печи должны иметь перепускные задвижки (*8–10*). При работе в разомкнутом цикле *8*, *10* — открыты, *9* — закрыта (нагретый воздух с парами растворителя выпускается в атмосферу) — период сушки $\tau_1$ (рис. 69). В замкнутом цикле задвижка *9* открыта, *8*, *10* — закрыты, воздух циркулирует по контуру из камеры (*5*), теплообменник (*7*) через вентилятор (*1*), нагревательную (*2*) и сушильную камеру (*5*), период $\tau_2$.

Для экономии энергоносителя при работе печи в разомкнутом цикле горячий воздух с парами до выброса его в атмосферу направляется в теплообменник (*7*), где он отдает тепло поступающему в вентилятор (*1*) холодному воздуху из атмосферы.

Конструкции сушильных печей должны удовлетворять требованиям:

1) равномерного распределения температуры во всех точках сушильной камеры, колебание температуры должно быть не более ±5°С. Для этого в ней должны быть созданы правильно распределенные подвод и отвод воздуха и обеспечена рациональная рециркуляция отработанного воздуха;

2) возможности использования автоматики для поддержания температуры в сушильной камере на одном уровне;

3) удобства загрузки и выгрузки камеры высушиваемыми деталями;

4) возможность механизации трудоемких работ.

*Достоинства* конвективного способа сушки: экономичность (можно использовать для нагрева воздуха практически любые наиболее дешевые виды энергоносителей); высокая производительность; простота оборудования; возможность использования механизации и автоматизации трудоемких процессов. *Недостатки:* сушка начинается с поверхности пропитанных обмоток, поэтому целостность уже образовавшейся на ней пленки лака нарушается новыми удаляемыми порциями растворителя из более глубинных

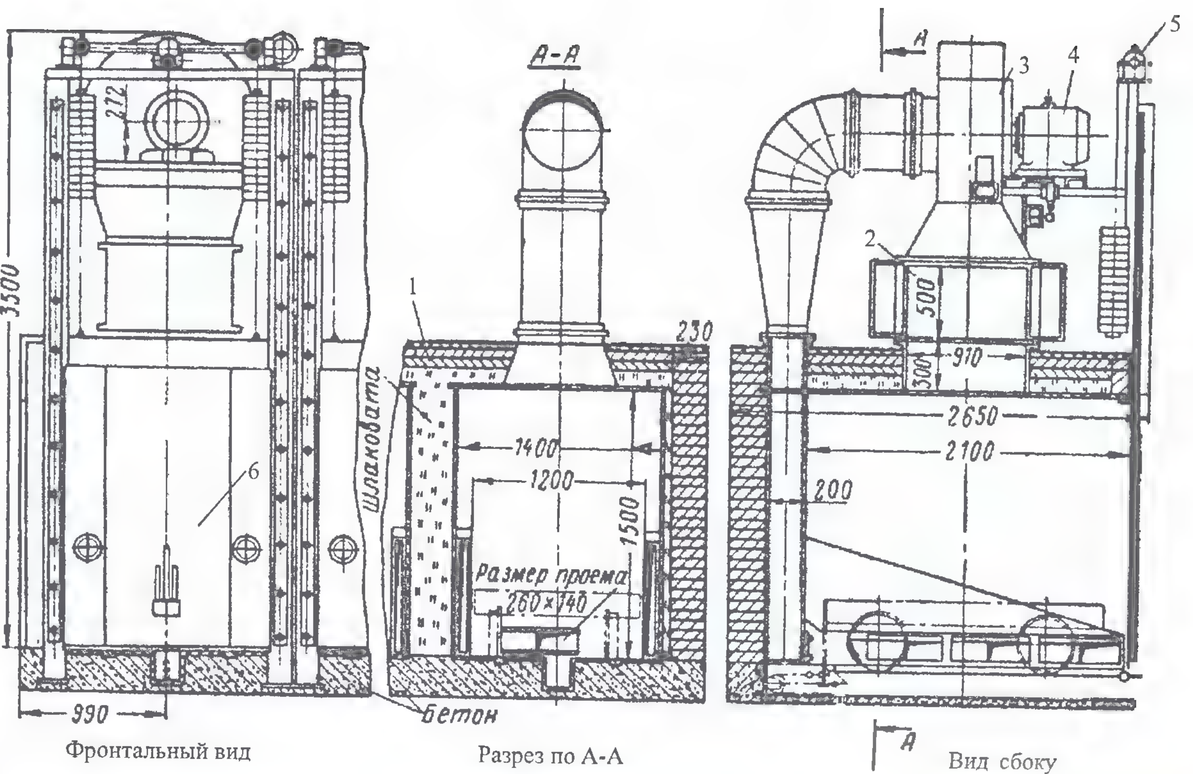



*Рис. 71.* Сушильная тупиковая камера с электрическим нагревом: *1* — теплоизоляция; *2* — электрокалорифер; *3* — вентилятор; *4* — электродвигатель вентилятора; *5* — механизм подъема дверей; *6* — дверь

слоев. Кроме того, увеличивается длительность сушки. Требуется громоздкое оборудование, что связано с потребностью в больших площадях. Имеются повышенные потери тепла.

Невзирая на указанные существенные недостатки, конвективный способ сушки в тупиковых печах с электрическим нагревом воздуха и его принудительной циркуляцией в сушильной камере в ремонтной практике наиболее распространен.

Основные характеристики одной из таких камер (рис. 71):

| | |
|---|---|
| Размеры камеры (полезные) | 2000x1200x110 мм |
| Максимальная температура в камере | 120 °C |
| Мощность электрокалорифера | 36 кВт |
| Производительность вентилятора | 10 000 м³/ч |
| Скорость движения воздуха при входе в сушильную камеру | 4 м³/с |
| Мощность электродвигателя вентилятора | 8 кВт |
| Мощность электродвигателя для подъема дверей | 0,8 кВт |
| Скорость подъема заслонки | 0,3 м/с |

***Токовый способ*** сушки осуществляется за счет тепла от потерь в обмотках пропитываемых машин при протекании по ним постоянного или, чаще, переменного электрического тока.

При сушке по данному способу электрические машины подбираются по принципу одинаковых режимов сушки, которые зависят от многих показателей (конструкции, типа, габаритов и т.п.) и обязательно с одинаковыми *номинальными токами.* Их обмотки соединяются между собой последовательно и подключаются к источнику (рис.72), желательно, с пониженным и регулируемым напряжением. Так как эти обмотки сушатся в режиме короткого замыкания, а для получения нужной температуры требуется изменение величины тока, регулировка его выполняется изменением напряжения источника. Напряжение, необходимое для сушки ($U_C$), определяется по известному выражению

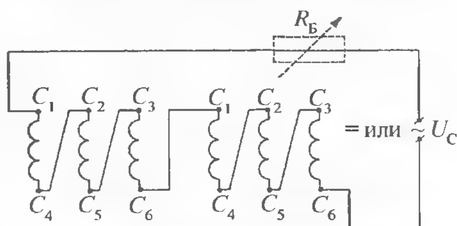


*Рис. 72.* Принципиальная схема токовой сушки

$$U_C = I_C \cdot (R_1 + ... + R_N),$$

где $I_C$ — ток сушки, А; $R_1 ... . R_N$ – сопротивления обмоток от 1 до $N$, Ом. При постоянном токе сопротивление берется омическим ($R$), при переменном — полным ($Z$) .

Величина тока сушки устанавливается экспериментально по требуемой температуре, которая должна быть в пределах 160–170°С. Температура обмотки контролируется термометром или термопарой.

Величина тока сушки может регулироваться также балластным сопротивлением, включенным последовательно в электрическую цепь (на рис. 72 — пунктир). Расчет сопротивления ($R_Б$) выполняется по закону Ома для постоянного напряжения сети ($U_C$).

При решении вопроса о способе регулирования тока сушки следует учитывать, что использование балластного сопротивления потребует дополнительного расхода энергии.

*Достоинства* способа: тепло создается в центре обмоток, следовательно, тепловой поток и направление выхода растворителя совпадают и образующаяся лаковая пленка не подвергается разрушению; допустимая температура сушки значительно выше, чем при конвективном способе; время сушки сокращается в 5–6 раз, что позволяет уменьшить расход электроэнергии в 4 раза; экономятся площади производственных помещений, так как не требуются специальные сушильные камеры и весь процесс может производиться в любом помещении; возможно включение пропиточно-сушильного процесса в технологический поток — пульсирующий конвейер. *Недостатки:* метод применим в основном только при пропитке обмоток водоэмульсионными лаками. При пожароопасных и токсичных растворителях лаков (ксилол и др.) использование способа связано с наличием отдельных помещений с прочными стенами и пожаростойкими дверями.

***Индукционный способ сушки*** осуществляется за счет тепла от потерь, создаваемых вихревыми токами в стали магнитопровода машины с пропитываемой обмоткой. Эти токи, в свою очередь, создаются переменным магнитным полем.

Такой способ допускает повышение температуры сушки до 180°С, так как и у него направление выхода растворителя лака совпадает с

направлением теплового потока. Время сушки сокращается. Лаковая пленка получается достаточно высококачественной.

Для получения переменного поля в ремонтных условиях через расточку статора машины (*4*) вокруг сердечника наматывается намагничивающая обмотка (рис. 73 (*3*)), параметры которой определяются расчетом.

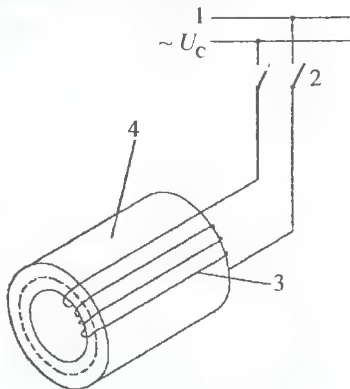



*Рис. 73.* Принципиальная схема сушки индукционным способом

Число витков намагничивающей обмотки:

$$W = \frac{U_C}{4{,}44 \cdot f \cdot B_C \cdot Q_C},$$

где $U_C$ — напряжение источника питания, В; $f$ — частота тока, Гц; $B_C$ — магнитная индукция в спинке статора, Тл; $Q_C$ — активное сечение спинки магнитопровода статора, м$^2$.

Активное сечение спинки $Q_C$ определяется по формуле (м$^2$)

$$Q_C = k_з (l_C - n_К b_К)\, h_C,$$

где $k_з$ — коэффициент заполнения пакета стали при изоляции листов стали лаком, при толщине листа $\delta = 0{,}5 - k_з = 0{,}93$; $l_C$ — полная длина магнитопровода статора, м; $n_К$ — число поперечных каналов охлаждения, шт.; $b_К$ — ширина поперечных каналов охлаждения, м; $h_C$ — высота спинки магнитопровода статора, м.

Величина тока намагничивающей обмотки, А:

$$I_C = \frac{H \cdot \pi \cdot D_0}{W},$$

где $H$ — напряженность магнитного поля, А/м; $D_0$ — средний диаметр спинки магнитопровода статора, м:

$$D_0 = D + 2h + h_C,$$

$D$ — внутренний диаметр магнитопровода статора, м; $h$ — полная высота паза, м.

При расчете параметров намагничивающей обмотки для электротехнических сталей большинства ремонтируемых машин (исходя из требуемой температуры сушки) магнитную индукцию $B_С$ чаще всего принимают равной 1 Тл, а напряженность (соответствующую этой $B_С$) — 500–520 А/м. Мощность, потребляемая при сушке, находится из выражения (кВ·А)

$$S = I_С \cdot U_С \cdot 10^{-3}.$$

Сечение провода намагничивающей обмотки П (мм²):

$$П = \frac{I_С}{\Delta},$$

где Δ — допустимая плотность тока, А/мм² (для медного провода — 1,8–2,2 А/мм², для алюминиевого — 1,6–2,0 А/мм².

*Достоинства:* высокое качество лаковой пленки; сокращенное время сушки за счет повышенной температуры (приблизительно в 5 раз по сравнению с конвективным); относительно пониженный расход электроэнергии. Данным способом можно сушить электромашины любых габаритов. *Недостатки:* потребность в намагничивающей обмотке, следовательно, дополнительный расход обмоточного провода; большие затраты труда. Например, при маломощных машинах и питании намагничивающей обмотки от источника стандартного напряжения ее $W$ достигает сотен витков, которые требуется намотать через расточку статора.

Несмотря на сказанное, для сушки крупногабаритных электрических машин в условиях мелких мастерских найти альтернативу этому способу трудно, тем более, что такие машины не требуют большого числа витков намагничивающей обмотки.

***Радиационный способ сушки*** осуществляется за счет передачи тепла при помощи излучений тепловыми инфракрасными лучами, которые проходят от источника до облучаемой поверхности почти без потерь. Тепловые лучи пронизывают лак и нагревают металл обмотки, а также другие части электрической машины, что обеспечивает совпадение направления теплового потока и выхода паров растворителя пропиточного лака.

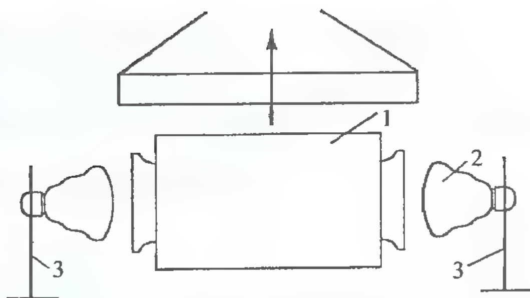



*Рис. 74.* Схема установки для сушки обмоток радиационным способом: *1* — магнитопровод с обмоткой; *2* — лампы инфракрасного излучения; *3* — штативы

В ремонтной практике источниками инфракрасного облучения служат обычные лампы накаливания или специальные — инфракрасного излучения. Последние имеют пониженную температуру нити накаливания, что продлевает срок их службы. К тому же у них меньшая часть электроэнергии превращается в видимый свет, большая — в тепловое излучение. Для направления потока лучей требуемым образом на баллоны этих ламп наносится зеркальный слой.

При сушке в стационарных условиях оборудуются специальные камеры с установленными в них лампами и стеллажами для размещения пропитанных узлов электромашин. При сушке на месте ремонтных работ лампы устанавливаются на штативах (рис. 74) в непосредственной близости от высушиваемого изделия.

*Достоинства:* высокое качество изоляционной лаковой пленки; сокращение требуемой площади сушильной камеры; интенсивное испарение растворителя, что сокращает время сушки, а также расход электроэнергии (приблизительно в 6 раз меньше, чем при конвективном методе). *Недостатки:* определенная сложность обеспечения равномерности облучения нагреваемых деталей и возможность в связи с этим местных перегревов, образования корки, пузырей, растрескивания и пр.

Способ достаточно широко применяется при частичном ремонте обмоток. Его можно рекомендовать для использования даже в мелких мастерских.

# Глава 13. Изолировочно-обмоточные работы по изготовлению статорных обмоток из жестких секций

Обмотки из жестких секций (или шаблонные) выполняются из готовых катушек. Естественно, в этом случае конфигурации и размеры секций должны до миллиметра соответствовать требованиям таких обмоток. Пазовая изоляция у них накладывается на активные части в полном объеме и рихтуется, поэтому формы пазов магнитопроводов должны быть открытыми.

Технологический процесс изготовления секций зависит от применяемых изоляционных материалов, величины номинального напряжения, конструкции и размеров электромашины.

Последовательность операций получения жестких секций приведена на рис. 75. На нем буквами показаны операции, цифрами — используемое оборудование и результат:

а) *намотка «лодочки»* (катушки) производится на шаблоне специального профиля (*1*). Шаблон делается из твердого материала (дерева, сплава алюминия и т.п.). Он должен позволять при намотке катушки ударами молотка через текстолитовую (фибровою, можно гетинаксовую) пластину проводить уплотнение и правку провода. Все изгибы шаблона и закругления должны обеспечивать целостность изоляции обмоточного провода. В результате намотки получается катушка (*2*), по профилю напоминающая лодочку, отсюда ее название;

б) *растяжка «лодочки»* (*2*) выполняется на станке (*8*). При перемещении захватов (*3*) и (*6*), которые приводятся в движение двухходовым винтом (*4*) от червячного колеса (*7*), получается нужный профиль катушки и ее головок (*10*), для чего у станка имеются держатели (*5, 9*). В результате образуется промежуточная форма секции (*11*).

В условиях отсутствия станка для небольших катушек растяжка «лодочки» может выполняться положенными друг на друга дву-

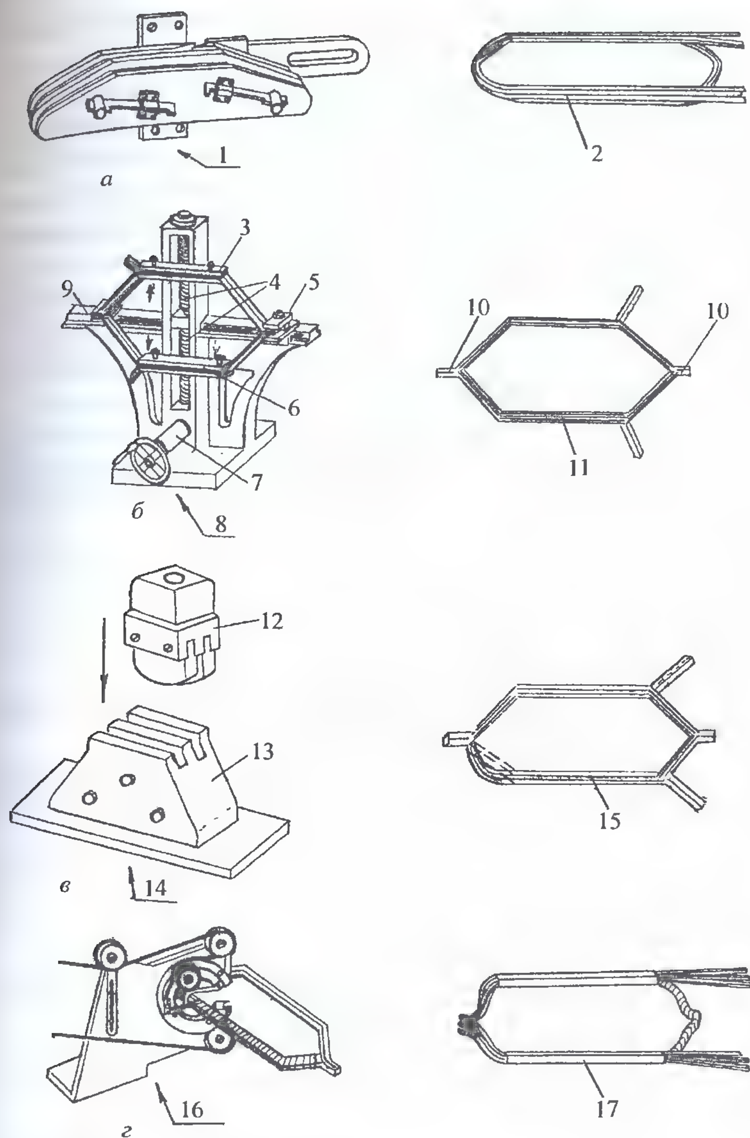



*Рис. 75.* Изготовление жестких секций

мя досками с прорезями для пазовых частей секции. Головки секции в этом случае зажимаются между деревянными (текстолитовыми) пластинами. Можно использовать и другие приспособления;

в) *рихтовка* (выгиб) *лобовых частей секции* выполняется на приспособлении (*14*) путем осаживания их в канавку шаблона с требуемой кривизной подвижной частью *12*. В результате получается секция нужной формы (*15*) (на рис. 75 показана полученная форма после рихтовки только одной половины лобовой части секции);

г) *изоляция секции* обмотки может выполняться на специальном станке (*16*). В результате получается секция (*17*) (на рис. 75 изоляция одной из лобовых частей секции еще не завершена). В тех случаях, когда станка нет, работа делается вручную.

Для электрических машин напряжением до 500 В и мощностью до 100 кВт при классе нагревостойкости *А* в условиях малых мастерских чаще всего изоляция секций выполняется в следующей последовательности:

- выводные концы изолируются чулком или одним оборотом хлопчатобумажной ленты в полуперекрытие;
- на лобовые части секции наносится слой ленты в полунахлест;
- пазовая часть секции обертывается лакотканью (изоляционной пленкой) до требуемой толщины;
- секция обматывается одним-двумя слоями защитной ленты (чаще всего киперной) встык на пазовой части, в полунахлест на лобовой;
- секция проходит сушку и пропитку с последующей горячей опрессовкой пазовой части.

Порядок укладки обмотки из жестких секций:

- проводится тщательная подготовка пазов (опиловка заусенцев и очистка), после чего их покрывают слоем лака;
- если статор имеет металлический кольцевой обмоткодержатель, то он изолируется несколькими слоями изоляционной ленты и покрывается лаком;
- при ломкой изоляции секций перед укладкой их предварительно нагревают током до 60–70°С (чаще всего используется сварочный трансформатор);

- у однослойной обмотки желательно обе стороны секции укладывать одновременно. При двухслойной первые секции (на расстоянии шага) укладываются только нижними сторонами, они осаживаются временными металлическими клиньями, под которые с двух сторон вставляют деревянные. Подколачиванием проводится осадка секций на дно паза. Так они выдерживаются до полного остывания. В пазы, где уложены оба слоя, заколачиваются постоянные клинья. Лобовые части секций рихтуются молотком через прокладку и подвязываются к обмоткодержателю;
- после укладки проводится пайка и изоляция соединений;
- в заключение делается пропитка и сушка.

Изготовление роторных обмоток из жестких секций принципиально ничем не отличается от выполнения статорных, только в завершающей части перед пропиткой и сушкой ротора, как правило, устанавливаются жесткие бандажи.

# Глава 14. Частичный ремонт обмоток трехфазных асинхронных двигателей

Излагаемая методика выполнения частичного ремонта обмоток трехфазных асинхронных двигателей распространятся на отечественные и импортные асинхронные двигатели с обмотками из мягких секций любой мощности напряжением до 500 В.

Статистика отказов асинхронных двигателей показывает, что до 80 % из них связаны с повреждениями в обмотках. При этом 70–75 % неисправностей обмоток приходится на витковые замыкания в секциях, 10–15 % на замыкания обмоток на корпус, т.е. до 90 % всех неисправностей в обмотках связано с повреждением лишь *одной секции*, тогда как все остальные находятся в рабочем состоянии. Такое положение позволяет в необходимых случаях проводить частичный ремонт обмоток электромашин.

Частичный ремонт обмоток асинхронных двигателей выполняется либо путем восстановления поврежденной секции, либо ее удалением из фазной катушки (катушечной группы).

Первый способ используется в случаях, когда время на ремонт обмотки не ограничено, а изоляция электромашины по степени ее старения может быть отнесена к первому (иногда второму) классу, при этом удаление поврежденной секции из пазов не испортит соседних катушек. Ремонт делается, как правило, лишь в стационарных условиях.

Второй способ целесообразно использовать в производственных экстремальных условиях, когда длительный простой вследствие отсутствия привода вызывает большие экономические потери (например, порчу сельскохозяйственной продукции).

При решении вопроса о рациональности любого вида частичного ремонта обмоток асинхронных двигателей должно быть техническое и экономическое обоснование. Частичный ремонт обмотки начинается с полной разборки асинхронного двигателя, установления места положения поврежденной секции и степени старения изоляции.

## 14.1. Определение поврежденной секции

Для определения секции с короткозамкнутыми витками и пазов в расточке статора, где она помещается, в основном используются следующие приборы и приспособления: подковообразный электромагнит, электронные приборы (типа ЕЛ 1), а также ферромагнитный шарик. Два первых способа изложены ранее.

*Способ определения витковых замыканий с помощью ферромагнитного шарика.* К поврежденной обмотке, соединенной по схеме «звезда» или «треугольник», от источника трехфазного тока подводится пониженное или регулируемое напряжение, например, от сварочного трансформатора. Оно должно быть такой величины, при которой ток в фазных обмотках не превысит номинального значения. Эти токи создадут в расточке статора асинхронного двигателя вращающееся магнитное поле. Помещенный туда ферромагнитный

шарик (можно от шарикоподшипника), вращаясь по направлению этого потока, перемещается против него (рис. 76).

Над пазами, в которых лежат активные стороны секции с короткозамкнутыми витками, шарик останавливается («залипает»). Такое явление объясняется наличием стоячих электромагнитных полей вокруг этих проводников, создаваемых в короткозамкнутых витках токами короткого замыкания.

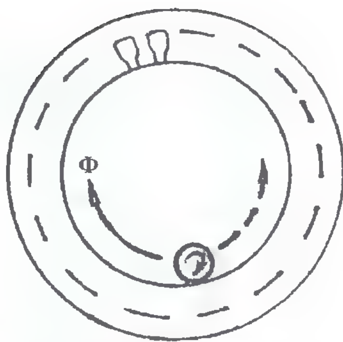



*Рис. 76.* Определение витковых замыканий в секциях методом «ферромагнитного шарика»

## 14.2. Техническое выполнение частичного ремонта

Техническое выполнение частичного ремонта обмоток асинхронных двигателей во многом зависит от места повреждения. Так, при замыкании витков в секции или на корпус в лобовой части обмотки весь ремонт может быть сведен к простой ликвидации обнаруженного повреждения. Его часто нетрудно найти по наличию «подгара» или изменению цвета изоляции обмотки в данном месте. Ремонт выполняется путем зачистки провода в месте замыкания и его изоляции (лентами, электротехнической бумагой, электрокартоном, лаками и пр.).

При замыкании в пазовой части обмотки ремонт выполняется, как уже говорилось: 1) путем восстановления поврежденной секции или 2) путем ее удаления из катушечной группы.

***Частичный ремонт обмоток восстановлением поврежденной секции.*** Например, у найденной поврежденной секции, в лобовой части обмотки, находятся ее концы, а также концы катушечной группы, в которую данная секция входит.

На рис. 77 показана трехсекционная катушечная группа, у которой вторая секция (2–2′) имеет короткое замыкание витков.

*Порядок операций:*

- обмотка в печи, сушильном шкафу или от сварочного трансформатора нагревается до температуры размягчения лаковой пленки.

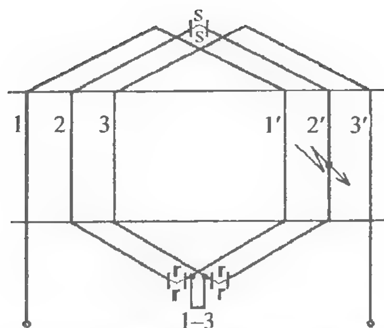



*Рис. 77.* Выкусывание поврежденной секции

- поврежденная секция кусачками (плоскогубцами, бокорезами) «выкусывается» из катушечной группы по сечениям r – r;
- с помощью какого-либо приспособления (ломика или др.) эта секция удаляется из пазов;
- освободившиеся пазы очищаются от грязи, остатков старой изоляции и продуваются сжатым воздухом;
- укладывается свежая пазовая изоляция (например, для класса нагревостойкости — *A*): тонкий пленкоэлектрокартон в два слоя, пленкой внутрь. Могут быть и другие конструкции. Важно только, чтобы коэффициент заполнения паза был как можно больше, а класс нагревостойкости оставался неизменным;
- в полость изоляционной коробочки (рис. 78) помещаются планки толщиной, равной диаметру провода обмотки электромашины.

Число планок должно быть равно числу слоев активных проводников секции в пазу; последний слой выполняется металлическими шпильками числом, равным количеству проводников в одном слое. В качестве шпилек можно использовать обрезки обмоточного провода длиной на 10–15 мм более длины планок с диаметром чуть большим, чем диаметр провода обмотки электродвигателя. Через шаг, в расточке статора, также изолируется и готовится второй паз;

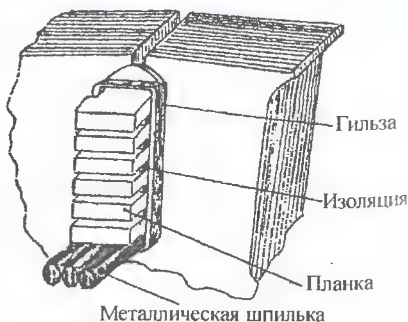



*Рис. 78.* Размещение планок и шпилек при выполнении обмотки «в протяжку»

- подготавливается обмоточный провод для новой секции. Для этого отрезается кусок, равный длине всей секции $l_C$ с учетом срезок $l_C = l_B \cdot (W_C + 2–3)$, где $l_B$ — длина витка, м; $W_C$ —

число витков в секции, шт. Поверхность провода натирается воскообразным диэлектриком для улучшения скольжения;

- подготавливаются приспособления, обеспечивающие укладку провода без его спутывания;

- вынимается металлическая шпилька из первого паза и на ее место протягивается обмоточный провод (рис. 79). Вынимается аналогичная шпилька из второго паза и проводится та же операция. Затем вынимаются рядом лежащие в этих пазах шпильки и укладывается второй виток. После укладки всех витков в первом слое из пазов удаляются вышележащие планки второго слоя и на их место помещаются металлические шпильки.

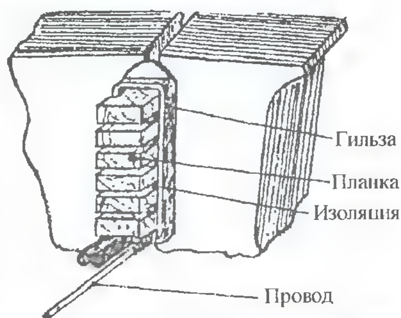
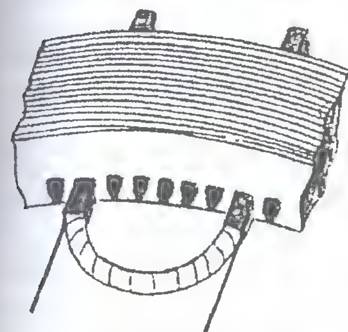


*Рис. 79.* Протяжка провода первого витка секции

Процесс укладки последующих витков секции остается прежним. По завершению укладки всех витков секции лобовые части ее изолируются и концы соединяют с целыми секциями катушечной группы (рис. 80).

Изложенный метод выполнения секции называется укладкой «впротяжку».


*Рис. 80.* Изготовленная секция методом «протяжки» после наложения изоляции

В том случае, если укладка новой секции возможна всыпным методом, выполнение ее производится в ранее приведенном порядке.

После восстановления секции проводится ее пропитка лаками и сушка.

Для пропитки рекомендуется использовать лаки воздушной (холодной) сушки: шеллак, бакелитовый лак на спирту и т.п. При их отсутствии можно использовать лаки го-

рячей сушки, но тогда после очистки от загрязнений всей обмотки ее пропитывают всю, желательно, погружением в ванну с лаком с последующей сушкой в сушильном шкафу или каким-либо другим способом.

***Влияние частичного ремонта обмотки на параметры асинхронного двигателя.*** Если при восстановлении секции обмотки трехфазного асинхронного двигателя в нее было уложено то же число витков, что и в поврежденной, все параметры электродвигателя полностью сохраняются. Но чаще 2–3 витка в конце укладки положить не удается. Это несколько увеличивает ток холостого хода, снижает cosφ и к. п. д., однако, почти всегда в допустимых пределах.

***Частичный ремонт обмоток удалением поврежденной секции из катушечной группы.*** Допустим, что не восстанавливается, а удаляется («выкусывается») секция рассмотренного ранее примера (катушечная группа трехсекционная, повреждена вторая секция 2–2′, рис. 77).

Порядок операций:

- обмотка в печи, сушильном шкафу или от сварочного трансформатора нагревается до температуры размягчения лаковой пленки;
- поврежденная секция 2–2′ кусачками (плоскогубцами, бокорезами) «выкусывается» из катушечной группы по сечениям r – r;
- рассекаются все витки поврежденной секции в лобовой части — сечение s – s. Делается это для того, чтобы ликвидировать замкнутые контуры короткозамкнутых витков;
- конец исправной первой секции 1–1′ перемычкой 1–3 (рис. 77) соединяется сваркой или пайкой с началом третьей секции 3–3′ (минуя концы второй поврежденной секции 2–2′);
- изолируются все оголенные токоведущие части обмотки (в местах сечений и соединений);
- проводится пропитка лаками холодной сушки.

***Влияние частичного ремонта обмотки на параметры асинхронного двигателя.*** Число витков в фазной обмотке асинхронно-

го двигателя ($W_{ФН}$) было рассчитано для данного магнитопровода по выражению

$$W_{ФН} = \frac{0,97 \cdot U_Ф}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot Q \cdot К_{ОБ}},$$

где $U_Ф$ — фазное напряжение, В; $f$ — частота тока, Гц; $B$ — магнитная индукция, Тл; $Q$ — площадь полюса, м²; $К_{ОБ}$ — обмоточный коэффициент.

Сокращение их при частичном ремонте обмотки (одна секция удалена), как это следует из формулы, вызывает увеличение магнитной индукции:

$$\uparrow B = \frac{0.97 \cdot U_Ф}{4.44 \cdot f \cdot Q \cdot K_{ОБ} \cdot W_Ф \downarrow}.$$

Это повышает магнитную напряженность (рис. 81, *а*) $H_Н$ до $H$. Но так как кривая $B = f(H)$ то же, что и $U_X = f(I_X)$ (характеристика холостого хода асинхронного двигателя), следовательно, увеличение магнитной индукции ($B$) резко повысит ток холостого хода (от $I_{Х.Н}$ до $I'_X$) (рис. 81, *б*). Причина в том, что индукция ($B$) при сокращении числа витков до $W_Ф$ переходит в зону насыщения, тогда как нормально (при $W_{ФН}$, т.е. до ремонта) она была равна $B_Н$ и ток холостого хода соответственно равен $I_{ХН}$.

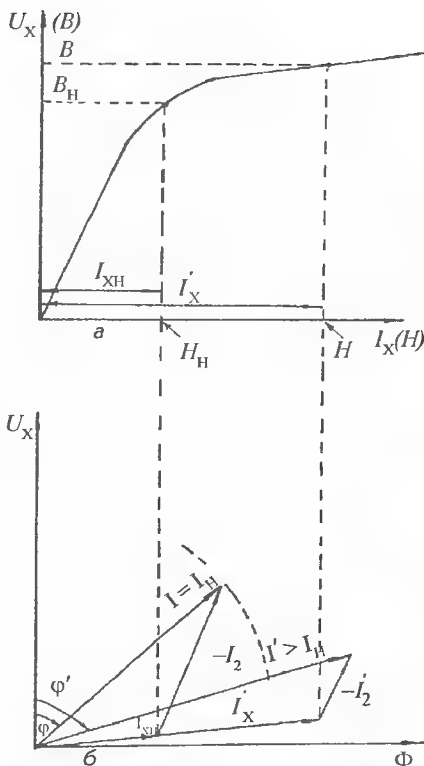



*Рис. 81.* Характеристика $U_X = f(I_X)$ (*а*) и векторная диаграмма токов и напряжения (*б*)

Однако номинальный ток $I_Н$ электромашины — величина неизменная, она определяется только допустимой температурой нагрева обмоток, тогда рост $I_X$ резко сокращает рабочий ток ($-I_2$) до $-I'_2$, потому что

$$I_Н = I = \uparrow I_X + \downarrow(-I_2),$$

где $I$ — ток в статорной обмотке, А.

Из той же диаграммы следует, что при сокращении числа витков $W_ф$ коэффициент мощности cosφ значительно уменьшается, угол φ увеличивается до φ′.

Увеличение магнитной индукции ($B$) вызывает также рост потерь холостого хода $P_X$, так как они пропорциональны $B^2$. Возрастают и потери короткого замыкания $P_K$, так как ток ($I$) в статорной обмотке повышается и часто даже на холостом ходу бывает близок к номинальному, следовательно, коэффициент полезного действия будет резко падать:

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P_1 - (P_X + P_K)}{P_1},$$

где $P_1$ — активная мощность, подведенная к двигателю, Вт: $P$ — мощность на валу асинхронного двигателя, Вт.

Исключение поврежденной секции из обмотки при частичном ремонте равноценно повышению напряжения (рис. 81, *а*), поэтому момент на валу двигателя, который пропорционален $U^2$, увеличивается, значит электромашина будет работать устойчиво (пусковой момент его — $M'_п$ будет > $M_в$ — момента нагрузки на валу), см. рис. 82, а частота вращения ротора несколько возрастает, снижается скольжение ($S$).

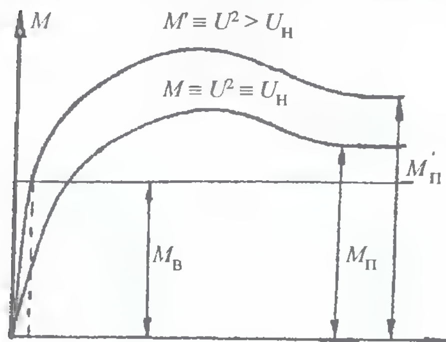


Рис. 82. Моментная характеристика асинхронного двигателя $M = f(S)$

Все сказанное позволяет сделать вывод, что частичный ремонт обмоток асинхронных двигателей путем удаления поврежденной секции рационален только для чрезвычайных случаев, так как все его энергетические характеристики низки. При этом, если требуется работа двигателя без сокращения нагрузки, срок его работы будет крайне ограниченным, потому что ток статорной обмотки (рис. 81, *б*) будет значительно превышать номинальный, а это ведет к быстрому старению изоляции.

Этот вывод подтвержден экспериментально. На рис. 83 приведены фазные токи ($I$) и коэффициенты мощности ($\cos\varphi$), а также средний (суммарный) коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя 4А90L4У3 мощностью $P_{Н}$ = 2,2 кВт ($U_{Н}$ = 380–220 В, $I_{Н}$ = 5,04 А, $n_{Н}$ = 1425 мин$^{-1}$, $\cos\varphi_{Н}$ = 0,83, КПД = 80,0%) с удаленной секцией в катушечной группе обмотки фазы А.

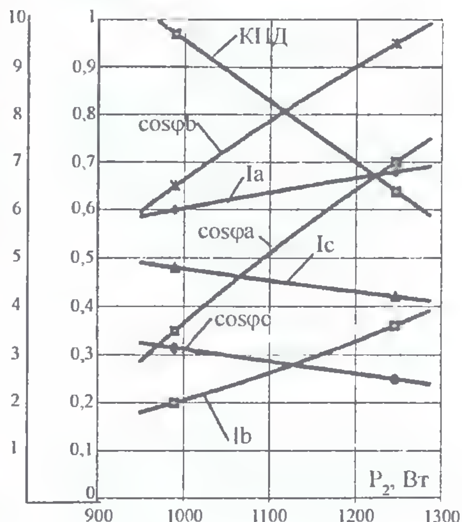



*Рис. 83.* Рабочие характеристики 4А90LА4У3, $P_{Н}$ = 2,2 кВт после удаления секции в обмотке фазы А

***Частичный ремонт обмоток удалением поврежденной секции из катушечной группы и с установкой в ней добавочного сопротивления.*** Для улучшения рабочих характеристик электромашин, в обмотке которых проведено «выкусывание» поврежденной секции, предложен новый способ частичного ремонта — с *добавочным сопротивлением* ($R_{Д}$) (рис. 84).

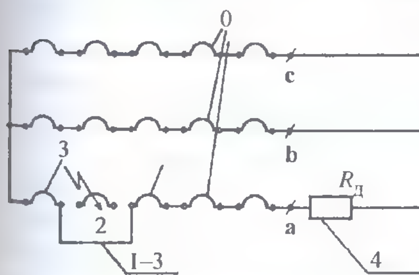



*Рис. 84.* Включение добавочного сопротивления в цепь обмотки с удаленной секцией: *0* — обмотки фаз; *1, 3* — здоровые секции обмотки; *2* — поврежденная секция; *1–3* — перемычка; *4* — сопротивление $R_{Д}$

Введение сопротивления $R_{Д}$ ограничивает величину тока в обмотке, из которой удалена секция и в значительной мере симметрирует нагрузку между всеми тремя фазами. Такое сопротивление $R_{Д}$ можно изготовить, например, в виде спирали из жаростойких материалов высокого электрического сопротивления (хромоникелевых или, более дешевых, хромо-

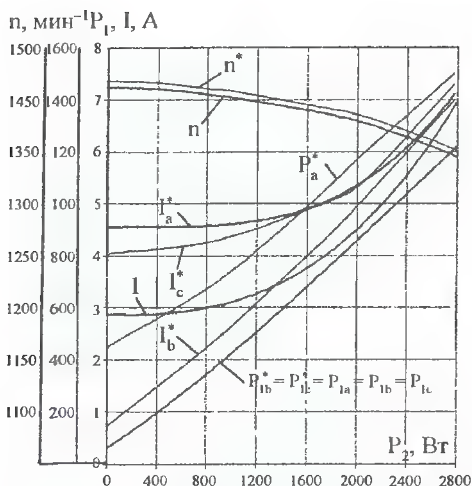



*Рис. 85.* Влияние частичного ремонта обмотки с использованием добавочного сопротивления $R_Д$ на рабочие характеристики 4А90LA4У3, $P_н$ = 2,2 кВт

алюминиевых сплавов, можно использовать и другие материалы). При этом обязательно сечение провода спирали должно соответствовать номинальному фазному току двигателя $I_н$.

*Ремонт* выполняется так же, как при способе простого удаления поврежденной секции. Отличие лишь в том, что после сборки машины в коробке выводов в цепь отремонтированной обмотки включается сопротивление $R_Д$.

Влияние добавочного сопротивления на рабочие характеристики двигателя 4А90LA4У3 показано на рис. 85, 86, где $P_2$ — мощность на валу электродвигателя, Вт; $P_1$ — активная мощность, потребляемая из сети, показана для одной фазы, Вт; $n$ — частота вращения ротора, мин$^{-1}$; $I$ — ток в обмотке одной фазы, А; cosφ — коэффициент мощности; φ — коэффициент полезного действия даны в относительных единицах к номинальному. Звездочкой показаны величины параметров машины после частичного ремонта обмоток, без звездочки — приведены те же данные до ремонта.

Из сравнения величин $P_1$ и $I$ следует, что потребляемая мощность в фазах $B$ и $C$ после ремонта практически не меняется ($P_{1b}^* = P_{1C}^* = P_{1A} = P_{1b} = P_{1C}$), но в фазе $A$ — мощность повысилась ($P_{1A}^* > P_{1A}$). Распределение токов по фазам резко изменилось: если до ремонта $I_a = I_b = I_C = I$, то после — в фазе $A$ — $I_a^*$ ток значительно увеличился, хотя намного меньше, чем при отсутствии $R_Д$; в фазе $C$ ток $I_C^*$ также возрос, но меньше, чем в фазе $A$; ток в фазе $B$ — $I_b^*$ уменьшился, однако при загрузке двигателя он возрастает значительно быстрее, чем в фазах $A$ и $B$. Это объясняется перераспределением нагрузки между фазами. Суммарный коэффициент полез-

ного действия ($\eta^*$) после ремонта заметно меньше, чем до частичного, но выше, чем при отсутствии в поврежденной цепи добавочного сопротивления $R_Д$. Характер изменения коэффициентов мощности (cosφ) по фазам приближенно отражает картину изменения токов и связан с их индуктивной составляющей.

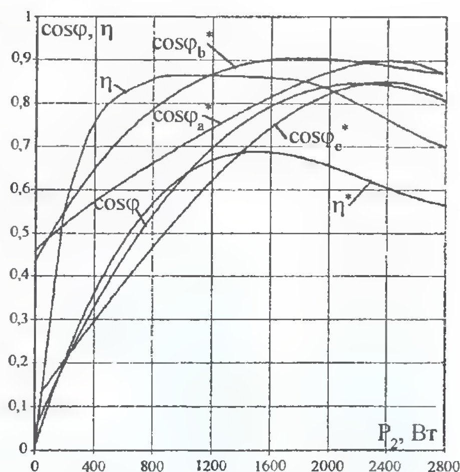



*Рис. 86.* Влияние частичного ремонта обмотки с использованием $R_Д$ на энергетические характеристики 4А90LА4У3, $P_Н$ = 2,2 кВт

Анализ величин и сравнение способов сокращенного ремонта обмоток позволяет заключить, что частичный ремонт обмоток трехфазных асинхронных двигателей методом удаления поврежденной секции с использованием добавочного сопротивления дает лучшие результаты: сокращается время на выполнение ремонта по сравнению со способом восстановления удаленной секции; улучшаются энергетические характеристики по сравнению с методом простого «выкусывания» нерабочей секции, снижается расход энергии в сети и двигателе, а также повышаются допустимая загрузка двигателя и надежность работы машины.

# Глава 15. Комплектовочные работы

Комплектовочные работы обычно выполняются работниками склада разобранных машин, мастером или, по его поручению, квалифицированными рабочими.

В соответствии с дефектной ведомостью они восполняют утраченные детали и узлы электрической машины до полного комп-

лекта: чаще всего к ним относятся прокладки, болты, гайки, винты, металлические и изоляционные шайбы, шпильки, иногда клеммные коробки, вентиляторы.

Вместе с указанной работой при комплектовке проводится замена деталей и узлов, находящихся в предельном состоянии, а в ответственных случаях — просто выработавших свой ресурс. Это относится, например, к подшипникам.

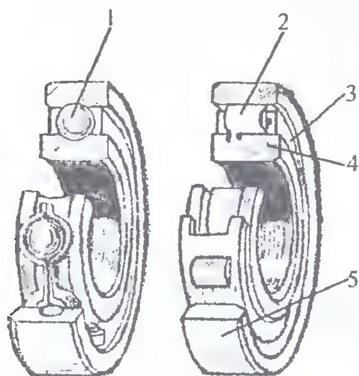


*Рис. 87.* Подшипники качения:
*1* — шарики; *2* — ролики; *3* — сепаратор; *4* — внутренняя обойма; *5* — наружная обойма

В настоящее время используемые в сельском хозяйстве электродвигатели почти всегда имеют в этом узле подшипники качения (рис. 87).

Подшипники должны заменяться на новые, если установлены существенные дефекты. Например, сильный износ рабочих поверхностей и деталей (обойм, сепараторов, шелушение шариков). Замена производится по данным старых подшипников (номера их выбиты на торце обойм).

При отсутствии требуемых подшипников, по договоренности с заказчиком, допускается устанавливать вместо них имеющиеся. Но при условии, что габаритные размеры гнезд позволят выполнить такую замену с помощью промежуточных втулок. Вместе с тем следует также учитывать, что срок службы этих узлов будет меньше.

Все восполняемые и заменяемые при комплектации детали должны быть работоспособными: грани болтов, гаек пригодны для работы ключом, прорези винтов — для работы отверткой, их резьбы должны обеспечивать надежное крепление. Клеммные коробки и вентиляторы должны отвечать размерам, а вентиляторы, кроме того, требованиям охлаждения данных машин. При комплектовочных работах выполняется обязательное правило — все восполняемые и заменяемые детали и узлы не должны после ремонта существенно влиять на нормальную работу отремонтированных электромашин.

# Глава 16. Слесарно-механические работы

Слесарно-механические работы выполняются в механическом отделении, которое должно иметь соответствующие участки (слесарный, станочный, сварочный и пр.), а также оборудование и инструмент для проведения требуемых видов ремонтных операций (токарные, сверлильные, фрезеровочные станки, верстаки, тиски и др.). Более подробно о них будет сказано далее.

Для сварочных и кузнечных работ участки чаще всего отгораживаются от отделения капитальной стеной с пожаробезопасными дверями. Все участки отделения должны иметь подъемно-транспортные средства, требования к которым были указаны ранее, и вентиляцию.

## 16.1. Ремонт корпусов и подшипниковых щитов электрических машин

Характер дефектов станин, частота их повторяемости и ремонт во многом зависят от материала изготовления. Например, откол лап наиболее часто встречается у чугунных корпусов, а коробление — у алюминиевых.

*Откол лап* нарушает нормальное крепление электромашины к фундаменту или к какому-либо другому изделию, что может привести к полному разрушению этой машины или изделия.

Восстановление утраченных лап чугунных и стальных корпусов выполняется обычно электродуговой сваркой старых лап (рис. 88, *а*) или приваркой новых. При этом особое внимание уделяется сохранению правильности подошвенной плоскости и сохранению расстояний между центрами отверстий. Разрешается приварка не более двух лап, расположенных накрест. Место сварки предварительно обезжиривается и очищается от окисления. С двух сторон снимаются фаски под углом 30–45° на глубину четверти толщины этих лап. У чугунных корпусов заварка проводится специальными электродами. Для предотвращения появления при сварке

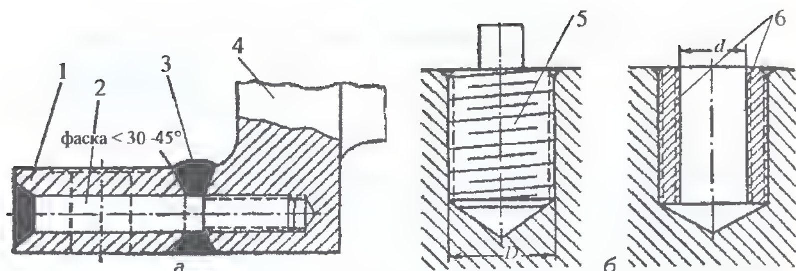



*Рис. 88.* Приварка отколотой лапы у корпуса электрической машины (*а*) и ремонт резьбы в отверстиях станины (*б*): *1* — лапа; *2* — ввертыш; *3* — место сварки; *4* — корпус; *5* — пробка; *6* — новая резьба

трещин они должны быть нагреты до 350–600°С. После сварки корпуса охлаждаются медленно для снятия внутренних напряжений в металле. Качество наложенных швов проверяется внешним осмотром (в частности, с помощью лупы с десятикратным увеличением), а также специальными приборами.

У электрических машин с большой массой для повышения надежности крепления приваренных лап ввертываются один или несколько стальных ввертышей (шпилек), диаметры которых обычно берутся равными половине толщины лапы. Приварка лап у алюминиевых корпусов проводится с помощью газовой горелки.

*Трещины* опасны для целостности корпусов машин. Перед заваркой они засверливаются с двух сторон (вначале и конце) для предупреждения расползания при выполнении операции. Кромки трещин зачищаются, снимаются фаски на глубину 3 мм под углом 45° и обезжириваются. Методы заварки зависят от материала корпуса и возможностей предприятия.

*Срыв резьбы* в отверстиях для крепления подшипниковых щитов с корпусом не дает возможности обеспечить надежное крепление щитов и может стать причиной серьезной аварии при нарушении соединения.

Дефекты в стальных корпусах ремонтируются заваркой гнезд электродуговой сваркой, сверлением новых отверстий и нарезкой в них резьбы. В чугунных и алюминиевых корпусах эти отверстия рассверливают на больший диаметр, нарезают резьбу и ввертывают стальные пробки 5 (рис. 88, *б*). В пробках просверливают отвер-

стия нужного диаметра $d$ и нарезают требуемую резьбу. Диаметр пробки берется на 6–10 мм больше диаметра резьбы в зависимости от толщины стенки корпуса. Желательно пробку приварить к станине (чтобы не проворачивалась). В последнее время для той же цели широко используют эпоксидный клей.

В алюминиевых корпусах, как показывает практика, болтовые соединения целесообразнее заменять на шпильки с гайками, меньше износ соединения.

*Износ посадочных мест* на корпусе вызывает проседание подшипниковых щитов и создает условия для перекоса ротора, а иногда и его заклинивания. Износ восстанавливается автоматической наплавкой газотермическим напылением, вибродуговой наплавкой и иными методами, известными из технологии металлов.

Автоматическая, как и полуавтоматическая, наплавка производится под слоем флюса или в среде защитного газа (углекислого, аргона или гелия) на специальных установках, обеспечивающих вращение детали, подачу проволоки и флюса в зону наварки.

Газотермическое напыление, или иначе металлизация, представляет собой напыление на поверхность детали расплавленного металла газовой струей. Оно выполняется электродуговым аппаратом.

Вибродуговая наплавка отличается от электродуговой наварки вибрацией электрода с частотой 20–100 Гц, что обеспечивает меньшую деформацию деталей вследствие меньшей температуры их нагрева. После указанных операций проводится обработка корпусов на станках.

Характерные повреждения подшипниковых щитов те же, что и у корпусов. Методы устранения принципиально ничем не отличаются от рассмотренных.

## 16.2. Ремонт валов

Забоины и задиры на валах, износ посадочных мест, трещины, повреждение шпоночной канавки часто мешают нормальной работе машины.

*Забоины* малые на торцах вала удаляются на токарном станке. Глубокие и даже малые, но если сокращение длины вала недопустимо, удаляются на станке, после того как на торцах вала наварят металл.

*Задиры* на поверхности шейки вала, не превышающие по площади 3–4 %, снимаются шабером и зашлифовываются наждачной бумагой. При больших задирах необходима наварка или металлизация.

*Износы посадочных мест* под подшипники приводят к ослаблению посадки подшипников и их проворачиванию на валу, нагреву и заклиниванию ротора. Износы во многом зависят от твердости поверхности и шероховатости.

*Шероховатость поверхности* оценивается средним арифметическим отклонением профиля $R_A$ и высотой неровностей $R_Z$. В соответствии со стандартом для подшипников нулевого класса при их внутренних диаметрах менее 80 мм $R_Z$ не должна превышать 1,25 мкм, если диаметры более 80 мм — $R_Z$ не должно быть больше 2,5 мкм. Подшипники классом выше требуют высоту неровностей значительно меньше.

*Износы поверхностей валов* устраняются металлизацией или вибродуговой наплавкой с последующей обработкой на станках.

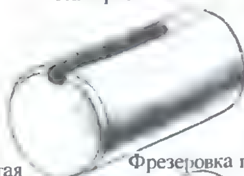
*Трещины валов* заваривают и обрабатывают заподлицо с основной поверхностью.

*Повреждение шпоночной канавки* ослабляет крепление ротора электромашины с агрегатом, который он приводит в действие.

Повреждения устраняются либо расширением и углублением канавки с использованием двухступенчатой шпонки (рис. 89, *а*), либо путем ее заварки с последующей механической обработкой (рис. 89, *б*). Иногда на валу прорезается под шпонку новый паз со сдвигом по окружности, приблизительно, на 90° от старого (рис. 89, *в*). При этом ось вала должна лежать в одной плоскости и совпадать с осью симметрии старой шпоночной канавки. Изношенные шпонки заменяются на новые.

*Прогиб* (изгиб, искривление) вала нарушает нормальное распределение магнитного потока под полюсами электромашины, так как делает ее воздушный зазор неравномерным. К тому же при боль-







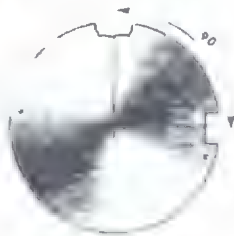



*Рис. 89.* Ремонт шпоночной канавки валов

ших прогибах возможно повреждение стали магнитопроводов и даже заклинивание. Искривление вала (рис. 90) для машин малых мощностей (при диаметре валов до 40 мм) исправляют под прессом. Правка возможна на токарном станке с помощью ломика с обязательным использованием прокладок из мягкого материала.

При изгибах вала до 0,3 % от его длины правка обычно проводится в холодном состоянии, при больших искривлениях требуется нагрев.

*Ослабленная посадка магнитопровода на валу* ремонтируется заменой старого вала на новый или его восстановлением путем металлизации или накатки.

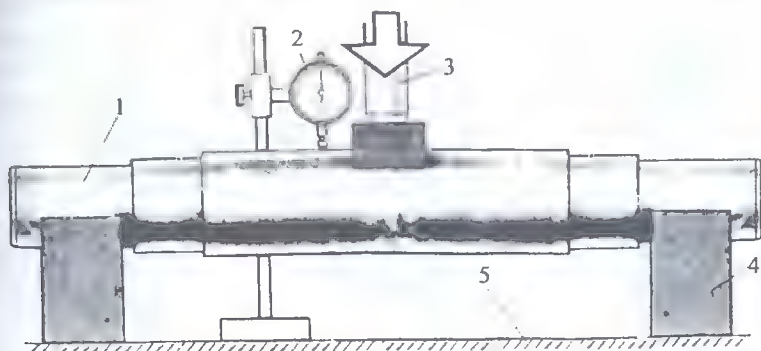



*Рис. 90.* Исправление прогиба вала: *1* — вал; *2* — индикатор; *3* — шток пресса; *4* — призма; *5* — стол пресса

## 16.3. Ремонт подшипников качения

Без крайней необходимости снятие подшипников с вала не допускается, ибо каждая такая операция связана с ослаблением посадок и возможностью их разрушения. Вместе с тем посадки внутреннего кольца подшипника на валу и внешнего в гнезде щита должны быть плотными и в эксплуатации: они не должны допускать проворачивания колец ни при каких условиях (иначе — повышенный нагрев, заклинивание ротора). Поэтому в электрических машинах подшипники насаживаются на вал с натягом. Растягивание (деформация) на валу внутреннего кольца подшипника прямо пропорционально величине натяга ($G$), оно уменьшает радиальный зазор на величину $\delta = 0{,}6\ G$ мкм, что может привести к заклиниванию ротора. Это учитывается при установке подшипников проверкой измерения зазоров.

Перемещение подшипников вдоль вала допустимо только под действием легких ударов молотка через мягкую прокладку (дерево, текстолит, алюминий и т.п.). В затруднительных случаях используется нагрев. Наружные кольца в гнездах подшипниковых щитов обычно имеют более свободную посадку.

Если ремонт подшипников связан с их заменой на другие номера, то он чаще всего требует установки *дополнительных* деталей: внутренней ремонтной втулки (*1*) на вал электромашины (*4*) (рис. 91, *а*), когда отверстие внутренней обоймы (*5*) подшипника-за-

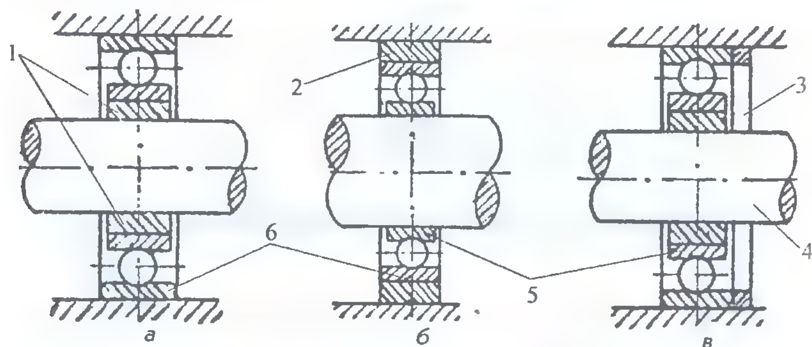



*Рис. 91.* Установка подшипников-заменителей с внутренней (*а*), наружной (*б*) ремонтной втулкой; с упорной шайбой (*в*)

менителя ему не соответствует. Либо наружной ремонтной втулки (*2*) на наружную обойму подшипника (*б*) (рис. 91, *б*), когда диаметр обоймы не соответствует размерам гнезда в щите. Возможна установка упорной шайбы (*3*) (рис. 91, *в*), когда ширина подшипника-заменителя меньше ширины гнезда. Устанавливаются ремонтные втулки на вал и на наружное кольцо подшипника напрессовкой или их ставят с напряженной посадкой, для чего втулки предварительно нагреваются в ванне с машинным маслом при температуре до 90°С.

Запрещается при напрессовке подшипника прикладывать усилие к телам качения (шарики, ролики), оно должно прикладываться только к обоймам.

## 16.4. Ремонт магнитопровода

Серьезные повреждения магнитопровода (большие оплавления, механические разрушения и т.п.) приводят к полной непригодности машины.

*Заусенцы, задиры, вмятины* повышают потери от вихревых токов в электротехнической стали. Они удаляются шабером или шлифовальным камнем.

*Оплавленные части магнитопровода* (рис. 92) (при относительно небольших разрушениях) вырубают на глубину сплавленных листов стали. Это место зачищают и покрывают для восстановления изоляции между ними лаком. Если есть необходимость, на зуб устанавливают вставку из текстолита на клеящем лаке. У паза полость чаще всего заполняют специальной замазкой заподлицо с его дном и стенками.

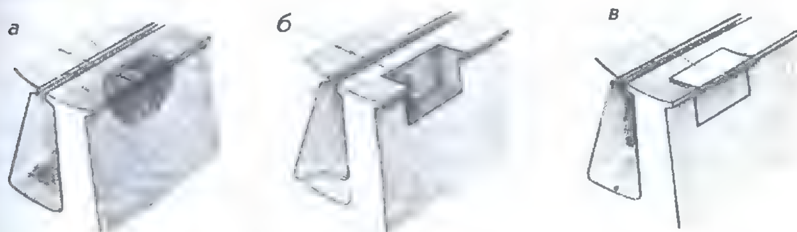



*Рис. 92.* Ремонт оплавленной части зуба магнитопровода: *а* — выгоревший, оплавленный участок; *б* — вырубка участка; *в* — вставка из текстолита

*Расслоение (распушение) листов стали* зубцов на торцах магнитопровода вызывает повышенный шум в электрической машине вследствие колебания листов в переменном магнитном поле. Повреждение устраняется склеиванием их лаками. Кистью промазывают промежутки листов и пропущенными через пазы болтами (шпильками с гайками) стягивают магнитопровод (рис. 93) и просушивают.

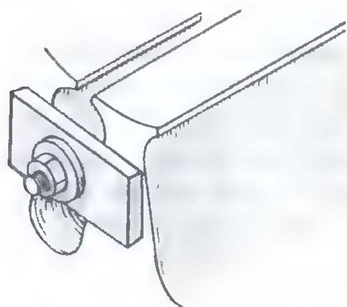


Рис. 93. Стяжка зубца при склеивании листов стали

Допускается скрепление распушенных листов зуба сваркой. Для чего, после стяжки зубцов, в них предварительно пропиливаются ножовкой наклонные пазы. Заваренная поверхность обрабатывается заподлицо с расточкой магнитопровода. Длина шва не должна быть более 5–10 мм, так как он замыкает между собой изолированные листы стали.

*Ослабление прессовки* магнитопровода также приводит к повышенному шуму в машине. Ликвидируется путем наложения на торец магнитопровода листа электрокартона или текстолита, вырезанных по форме листа стали. Для этого снимают с одной стороны статора нажимную шайбу, подкладывают под нее подготовленный лист, толщиной дополняющей пакет электротехнической стали сердечника до нужного размера при опрессовке. Опрессовка выполняется с помощью двух колец, установленных по торцам магнитопровода и шпилек, пропущенных через расточку статора, а также через отверстия в этих кольцах. Гайками осаживают нажимную шайбу. Устанавливают шпонки в корпусе машины, либо пакет скрепляют струбцинами.

*Смещение отдельных листов магнитопровода* (т.е. часть листов зубца заходит в паз). Для пазовой изоляции обмотки это соответствует ножу. Смещение устраняется 3–4-мя стальными оправками, отвечающими профилю и размеру паза, которые одновременно прогоняются через противоположные пазы. Заходная часть оправок делается конической.

*Разрушение межлистовой изоляции магнитопровода*, с одной стороны, замыкает накоротко листы электротехнической стали, с другой — нарушает прессовку пакета. Ликвидируется восстановлением изоляции листов. В этом случае выпрессованный сердечник расшихтовывается, листы зачищаются (щетками и пр.). На каждый из них кистью (катком) наносится слой лака, просушивается, и магнитопровод собирается вновь. Стоимость такого ремонта очень высока и должна быть технико-экономически обоснованной.

В завершение ремонта проверяется качество магнитопровода. Для этого на сердечник *1* (рис. 94) через расточку статора наматывается намагничивающая обмотка *2*, которая создает в нем переменный магнитный поток плотностью 1 Тл. Количество витков обмотки (при $f = 50$ Гц) по формуле (50) равно, шт.:

$$W_{об} = \frac{U_и}{222 \cdot Q_с},$$

где $U_и$ — испытательное напряжение, В; $Q_с$ — сечение спинки сердечника, м $^2$, $Q_с = к_з \cdot h_с \cdot l_с$; где $h_с$, $l_с$ — соответственно высота и длина спинки, м; $к_з$ — коэффициент заполнения стали.

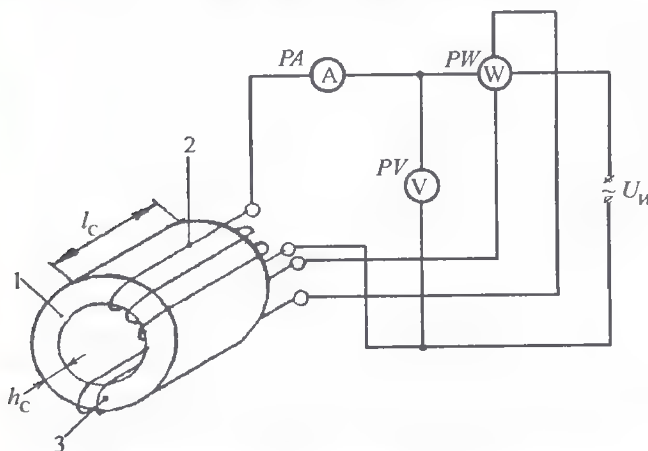



Рис. 94. Схема испытания магнитопровода переменным током

Для измерения потерь в стали наматывается вспомогательная обмотка *3*, в цепь которой включается ваттметр. Число витков обмотки $W_{\text{в.о}}$ определяется из выражения, шт.:

$$W_{\text{в.о}} = \frac{U_{\text{вт}}}{222 \cdot Q_{\text{с}}},$$

где $U_{\text{вт}}$ — напряжение обмотки ваттметра, В.

Полученные величины тока $I$ (А) и потерь $P$ (Вт) сравниваются с допустимыми (справочники, ГОСТ на электрические машины). Завышенная величина тока $I$ обычно связана с недокладкой листов стали в магнитопроводе, мощности $P$ — с нарушением изоляции между ними.

Кроме того, через 80–90 мин после начала испытания (термометрами или термопарами) замеряются температуры в различных точках магнитопровода. Перегрев над температурой окружающей среды в максимально нагретой точке не должен превышать 45°С. Различие между температурами отдельных зубцов — 25–30°С. В случаях нарушения указанных норм сердечник подвергается повторному ремонту.

## 16.5. Ремонт роторных обмоток

Ремонт роторных обмоток короткозамкнутых асинхронных машин, выполненных в виде беличьих клеток, во многом зависит от материала обмоток. Основные повреждения и их ремонт следующие.

*Нарушения паек* в местах соединения стержней и короткозамыкающих колец беличьих клеток (медных и латунных) определяются по наличию в данном месте вследствие повышенного нагрева цветов побежалости, темных пятен и окалины.

Неисправности устраняются путем перепайки соединений. Эти места зачищают, протирают чистой ветошью, смоченной в бензине (ацетоне), протравливают в течение 15–30 с в азотной кислоте и паяют с последующей промывкой в горячей воде. Беличьи клетки электродвигателей с тяжелыми условиями пуска паяют серебряными припоями марок ПСр или медно-цинковыми — марок ПМЦ.

При легких пусках рекомендуются медно-фосфорные припои марок ПМФ. Флюсом для всех марок служит бура. Пайка выполняется в основном газовая, обычно двумя горелками: одна используется непосредственно для пайки, другая — для подогрева и поддержания температуры кольца и концов стержней в заданных пределах. При этом недопустимо расплавлять припой в пламени горелки. Палочкой припоя касаются уже нагретых до нужной температуры мест на наружной поверхности кольца. После пайки проводится зачистка.

*Обрывы* в *стержнях пазовой части обмотки* увеличивают скольжение ротора электромашины, снижают ее мощность. Обмотки из алюминия при таких повреждениях не ремонтируются. В этом случае старая роторная обмотка либо (при 700–750 °С) выплавляется, либо растворяется погружением в ванну с 40–50 %-ым раствором каустической соды. Химический способ имеет то достоинство, что не деформирует сердечник ротора, недостаток — токсичность.

Новая алюминиевая беличья клетка в ремонтной практике отливается статическим или вибрационным методами. В обоих случаях сердечник ротора заключается между двумя чугунными формами — кокилями с пустотами по форме короткозамыкающих колец с крыльями вентилятора и спрессовывается. Затем эта конструкция разогревается до 500–550°С. Заливка выполняется алюминиево-марганцевым сплавом с содержанием марганца 2–3 % и с температурой 750–780°С.

При статическом способе заливки (рис. 95) конструкция (форма) устанавливается в наклонном положении и заполняется металлом через высокие литники. Достоинство метода — простота, недостаток — часты случаи брака из-за плохого заполнения пустот формы.

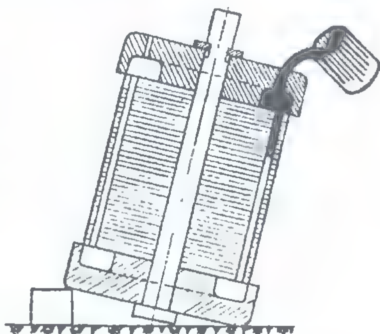


*Рис. 95.* Статическая заливка формы

Вибрационный способ заливки требует специальной установ-

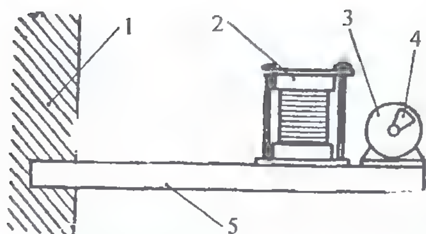


*Рис. 96.* Схема вибрационной установки для заливки пустот формы

ки. Простейшая из них (рис. 96) представляет собой балку (плиту) *5*, один конец которой заделан в стенку *1*, на другом установлен маломощный электродвигатель *3* с дисбалансом *4* на роторе, который при заливке обеспечивает колебания формы *2*, закрепленной на балке.

Медные и латунные беличьи клетки с обрывами стержней в пазовой части магнитопровода ремонтируются заменой стержней при полной разборке клетки.

Для этого распаивают все соединения стержней с короткозамыкающими кольцами и снимают кольца. Поврежденные стержни выбивают из пазов сердечника молотком через прокладку из мягкого материала: алюминия или твердых пород дерева. Удаление можно выполнять также с помощью винтовых приспособлений. На их место забиваются новые стержни (материал их должен соответствовать старым) и устанавливают обратно короткозамыкаюшие кольца. После обработки вышеуказанным методом мест соединений проводятся пропайка и зачистка.

Обрывы и глубокие трещины на выступающих (из магнитопровода) концах стержней медных, а также латунных беличьих клеток обычно устраняются с помощью заполнителя. Высверливается с торца часть стержня до удаления повреждения. В оставшейся части сверлится отверстие меньшего диаметра, в который вставляется конец заполнителя длиной 5–7 мм, проводится пайка для соединения заполнителя со стержнем и короткозамыкающим кольцом.

*Трещины, надломы в короткозамыкающих кольцах* алюминиевых обмоток вырубаются и обрабатываются в виде «ласточкина хвоста». Обезжириваются, нагреваются до 400–450°С и запаиваются припоем с температурой плавления 380°С, состоящим из 67 % алюминия, 21 % олова, 12 % меди. Вместе с приведенным на производстве для той же цели широко используется припой с составом 63 % олова, 33 % цинка, 4 % алюминия, температура плавления его также 380°С.

При пайке ротор размещается так, чтобы запаиваемое место находилось в горизонтальной плоскости. Неостывшие излишки припоя удаляются нагретой стальной пластиной. У медных и латунных беличьих клеток такие дефекты ремонтируются пайкой по вышеописанной методике.

## 16.6. Ремонт вентиляторов и их кожухов

Нарушение отвода тепла ведет к перегреву электрической машины при ее номинальной нагрузке на валу. Кроме того, искривление вентиляторов, утеря лопаток нарушает балансировку роторов и вызывает вибрацию.

Ремонт чаще всего связан с правкой вентиляторов, кожухов или восстановлением их отдельных деталей. В конструкциях вентиляторов, где крепление лопаток выполнено заклепками, при ослаблении соединений эти заклепки срубаются, отверстия рассверливаются и лопатки приклепываются заново. Вместо клепки можно использовать электросварку. Утерянные лопатки восстанавливаются по старым образцам. Слабину втулки вентилятора на валу устраняют одним из изложенных ранее методов. После ремонта вентилятор не должен иметь радиальное биение более 1 мм, осевое — 1–2 мм.

## 16.7. Ремонт коробки выводов

Дефекты коробки выводов (клеммной коробки) нередко становятся причиной серьезных аварий: коротких замыканий, работы электромашины в неполнофазном режиме и пр. Характер ее ремонта определяется материалами изготовления и конструкцией выполнения выводов.

*Трещины* алюминиевых коробок завариваются газовой сваркой или запаиваются припоем по вышеописанной методике. Стальные коробки завариваются электросваркой с последующей обработкой. При полном разрушении коробок они заменяются.

*Подгары* на изоляционных клеммных панелях (колодках, щитках) зачищаются стеклянной шкуркой. Эти места покрываются лаком.

*При прогарах* в панелях изготовливаются новые из текстолита, гетинакса и т.п. по размерам старых.

*Нарушение резьбы* на клеммных винтах и гайках вследствие плохого контакта приводит к их перегреву. Неисправность устраняют заменой на новые.

*Обломы проводов жил выводов* разрывают электрическую цепь. Поврежденные участки удаляются кусачками. При необходимости наращиваются концы.

*Дефекты изоляции* концов выводов часто становятся причиной короткого замыкания, нарушения контакта, устраняются липкой лентой.

*Утерянные наконечники выводов* восстанавливаются припайкой новых. При их отсутствии конец жилы вывода изгибают в виде кольца и «залуживают». В соответствии с ГОСТом начало обмоток трехфазных асинхронных двигателей обозначают: $C_1$, $C_2$, $C_3$, а концы — $C_4$, $C_5$, $C_6$.

При утрате маркировки концов выводов обмоток ее восстанавливают методами переменного или постоянного тока.

*1. Маркировка концов обмотки трехфазного асинхронного двигателя методом переменного тока.* По данному методу в начале (с помощью тестера или какого-либо другого прибора) определяют концы обмоток фаз *A-A'*, *B-B'* и *C-C'*.

Произвольно один из найденных выводов принимается за начало обмотки первой фазы — $C_1$. Конец ее $C_4$ соединяют с выводом обмотки другой фазы (В или С). Полученные две последовательно соединенные обмотки включаются на пониженное напряжение электрической сети переменного тока. Свободные концы обмотки третьей фазы присоединяются к вольтметру или контрольной лампе (рис. 97).

Если после подключения к сети двух последовательно соединенных обмоток ЭДС обмотки третей фазы равна нулю (стрелка вольтметра не отклоняется, лампа не загорается), то первые две соединены одноименными выводами $C_4$ с $C_5$ (рис. 97, *а*), если ЭДС не равна нулю (стрелка отклоняется, лампа загорается), обмотки соединены разноименными выводами $C_4$ с $C_2$ (рис. 97, *б*).

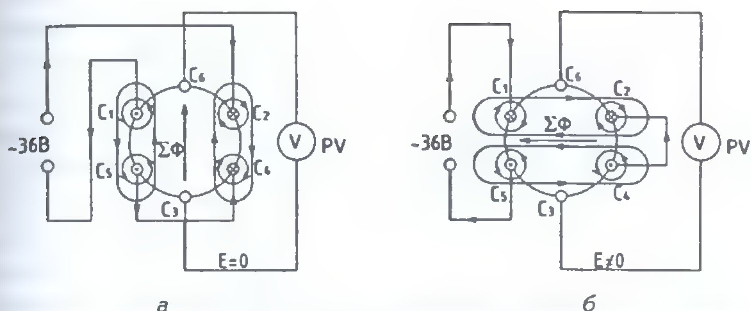



*Рис. 97.* Маркировка концов обмоток трехфазного асинхронного двигателя методом переменного тока

Отсутствие или появление ЭДС в обмотке третьей фазы объясняется тем, что в первом случае суммарный поток ΣФ от проводников с током двух обмоток не пронизывает контура третьей, а только скользит по нему, во втором случае суммарный магнитный поток ΣФ пересекает силовыми линиями витки третьей обмотки, т.е. пронизывает ее контур. На рис. 96 направления токов в проводниках обмоток приведены для момента *t*, так как ток переменный: знаком + показан конец вектора тока в проводнике, знаком ⊙ — его острие.

Определение концов третьей обмотки $C_3$ и $C_6$ выполняется в следующей последовательности: обмотка фазы, ранее подключенная к вольтметру или контрольной лампе, меняется местами с обмоткой фазы $C_2$–$C_5$ и аналогично определяются ее начало и конец.

*2. Маркировка концов обмотки трехфазного асинхронного двигателя методом постоянного тока.*

По этому методу после определения концов обмоток фаз *A*–*A*′, *B*–*B*′ и *C*–*C*′, собирается схема с источником постоянного тока (аккумулятор, сухой элемент, выпрямитель с напряжением 6–36 В), вольтметром магнитоэлектрической системы (рис. 98).

Источник (*1*) коммутационным аппаратом (*2*), импульсом включают на обмотку одной фазы (*3*), как показано на рис. 98. Примем конец, к которому подведен положительный потенциал, за $C_1$ и получим конец — $C_4$.

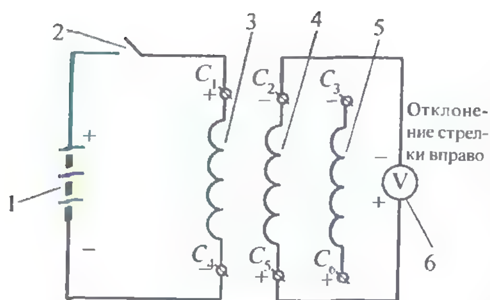



*Рис. 98.* Маркировка концов обмоток трехфазного АД методом постоянного тока

К обмоткам других фаз (*4, 5*) поочередно подключается вольтметр (*6*). Если при подаче напряжения от источника постоянного тока к обмотке стрелка прибора даст отклонение вправо, то в соответствии с законом электромагнитной индукции против *положительного* полюса на обмотке 3 на исследуемых будет *минус*, что фиксируется вольтметром. Это начала фазных обмоток *4* и *5* — соответственно $C_2$ и $C_3$, их концами будут $C_5$ и $C_6$.

Найденные начала обмоток $C_1$, $C_2$, $C_3$ и концы $C_4$, $C_5$, $C_6$ для удобства пересоединения со «звезды» на «треугольник» и обратно на панели коробки выводов располагаются в порядке, показанном на рис. 99.

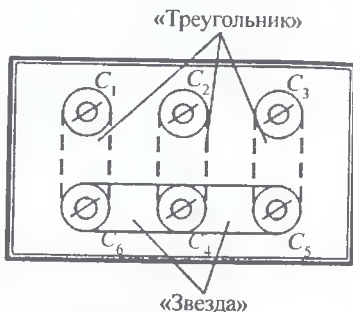



*Рис. 99.* Расположение выводов на панели коробки выводов трехфазного асинхронного двигателя

Если конструкцией машины обозначения концов на клеммной панели не предусматриваются, на выводы обязательно устанавливаются обжимы с нанесенной маркировкой.

## 16.8. Ремонт контактных колец

Ремонт контактных колец асинхронных машин с фазным ротором зависит от конструктивного выполнения узла и характера повреждений его деталей.

*Неисправности поверхности контактных колец* (подгары, потемнения, матовые пятна от электрохимических явлений, шероховатости) вызывают увеличение сопротивления контактов и ведут к

перегреву деталей узла. Ремонт выполняется зачисткой повреждений стеклянной бумагой, шлифовкой и полировкой деталей до зеркального состояния.

*Выработка, глубокие повреждения поверхности, биение* сокращают площадь соприкосновения контактных поверхностей, увеличивают плотность тока, вызывают повышенное искрение с усиленной их эрозией. Устраняются неисправности проточкой колец на станках с последующей шлифовкой и полировкой.

*Поверхностные нарушения изоляции* между кольцами и кольцами с корпусом удаляются зачисткой (ветошью, смоченной в органических растворителях, стеклянной бумагой) с последующим покрытием эмалями.

*Недопустимый износ, ослабление посадки на втулку, пробой изоляции* могут привести к тяжелым авариям и требуют переборки узла с заменой колец.

Новые контактные кольца вытачиваются из труб или отливок, материал которых (медь, чугун, сталь и пр.) соответствует материалу старых колец. Сборка узла выполняется или холодной напрессовкой этих колец на втулку или горячей посадкой на нее.

Наибольшее распространение получил первый способ. В этом случае на нижний диск *5* (рис. 100) укладывается комплект контактных колец (*10*). Контактные шпильки *8* с их изоляцией *9* пропускаются через специальные отверстия в предшествующих кольцах. Между кольцами равномерно по окружности ставятся стальные дистанционные прокладки (*3*) с уплотнителями (*6*). Во внутреннюю расточку колец закладывается изоляция (*11*), состоящая из нескольких слоев полос пропитанного электрокартона и миканита (иногда лакоткани), а также стальная разрезная гильза (*7*). Последняя служит для защиты изоляции от

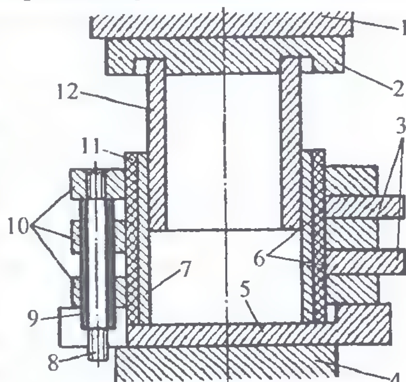


*Рис. 100.* Сборка контактных колец холодной прессовкой на втулку

механических повреждений при запрессовке втулки (*12*) в сборку контактных колец. Для этого на втулку (*12*) накладывается верхний диск (*2*). Давление обеспечивается деталями пресса (*1*) и (*4*).

Требуемое давление пресса зависит от толщины изоляции (приводится в технической документации). После окончания прессовки дистанционные прокладки удаляются, и втулка с кольцами сушится в печи.

Завершается сборка узла покрытием эмалью торцов контактных колец и промежутков между ними. Проточка, шлифовка и полировка колец проводится после посадки втулки на вал электромашины.

*Нарушение контакта* между кольцом и выводной шпилькой ремонтируют сваркой или пайкой твердыми припоями.

*Выгорание контактных шпилек* и неисправности их изоляции устраняются заменой на новые.

## 16.9. Ремонт коллекторов

Его объем и содержание соответствует конструкции коллектора и видам неисправностей.

*Потемнения контактных пластин и шероховатости* ведут к тем же последствиям, что и у контактных колец асинхронных машин. Ликвидируются они ветошью, смоченной в бензине, если этого недостаточно — обработкой стеклянной бумагой, шлифовкой, полировкой.

*Подгары* на пластинах обычно связаны с плохой пайкой петушков с повышенным биением рабочей поверхности из-за нарушения формы коллектора (в результате неравномерного износа) или с ослаблением прессовки цилиндра медных пластин. При последней неисправности характерно смещение (выступы) отдельных контактных пластин или их изоляции. Подгары увеличивают сопротивление контакта и нагрев коллектора. Смещение пластин вызывает усиленную вибрацию, искрение с повышенной эрозией контактной поверхности, выкрашивание щеток и ухудшение коммутации машины постоянного и переменного тока.

При нарушении контакта у петушков проводится перепайка тех пластин, которые имеют хотя бы незначительные признаки почернения. Подгар снимается так же, как и при потемнении пластин.

Ослабление прессовки у коллектора со стальным корпусом устраняется после его подогрева до 120–130°С, подтяжкой гайки (*1*), нажимной (конусной) шайбы (*2*) (рис. 101).

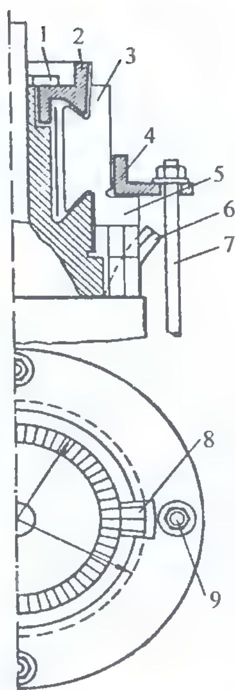


*Рис. 101.* Приспособление для удаления пластины из коллектора

Затем рабочая поверхность коллектора соответствующим образом обрабатывается в следующей последовательности:

1) *обточка*. Удаление минимального слоя меди с поверхности пластин. Делается резцом на токарном станке. У крупных машин — вращением якоря в собственных подшипниках;

2) *продораживание*. Понижение (выпиливание) изоляции между контактными пластинами коллектора. Производится специальной пилкой вручную или фрезой на станке глубиной от поверхности коллектора: для малых машин — 0,5–0,8 мм, для средних — 1,0–1,5 мм, для крупных — 2,0 мм. Большая глубина недопустима, так как может стать причиной короткого замыкания пластин вследствие заполнения канавок щеточной пылью;

3) *продувка* сжатым воздухом или обработка пылесосом для удаления медной и слюдяной пыли, оставшейся после второй операции;

4) *снятие фаски* на краях медных пластин для лучшего удаления пыли щеток;

5) *шлифовка и полировка*. Первая делается стеклянной бумагой или карборундовым мелкозернистым бруском, вторая — колодками или щетками из твердых пород дерева (бук, клен) для получения зеркально гладкой и прочной поверхности коллектора.

Такая обработка обеспечивает повышенную стойкость коллектора к истиранию щетками.

*Оплавление и выгорание пластин, пробой изоляции* между ними, *поломка петушков* часто требуют выемки одной или нескольких (однако не более пяти) медных или миканитных пластин из коллектора. В связи с тем, что при этом его монолитность или просто форма могут быть нарушены, используется специальное приспособление (*4*) (рис.100).

Порядок работ по удалению пластин следующий: снимается бандаж с лобовой части обмотки машины; отпаиваются и отгибаются концы секций (*6*); на петушки коллектора (*5*) накладывается диск приспособления (*4*) с вырезом (*8*) (по размеру одной или нескольких пластин) над вынимаемыми пластинами; диск прижимается стягивающими шпильками (*7*); вывинчивается гайка (*1*) и снимается нажимная шайба (*2*) с миканитной манжетой (на рис. 101 не показана); с помощью зубила легкими ударами молотка выбиваются поврежденные пластины (*3*) и заменяются новыми (тех же размеров и формы, тех же марок материала). Предварительно медные пластины спрессовываются с миканитными пластинками и между собой, если их несколько. На рис. 100 нижняя проекция коллектора с приспособлением показана без гайки и нажимной шайбы (9) — гайка стягивающей шпильки диска приспособления.

При незначительном выгорании пластин допускается этот участок меди обработать и припаять новую часть пластины твердым припоем.

Вместо замены медных пластин допустим также частичный ремонт петушков, если возможно обеспечить их хороший контакт с обмоткой машины и надежную изоляцию.

Предельное сокращение диаметра коллектора, нарушение изоляции между большим числом пластин, а также между ними и корпусом, поломка многих петушков обусловливают необходимость в полной разборке коллектора и его изготовлении заново. Выполнение такого ремонта возможно только на специализированных предприятиях. Там же должен производиться ремонт коллекторов с пластмассовыми корпусами, если он связан с разборкой.



## 16.10. Ремонт контактно-щеточного механизма

Ремонт контактно-щеточного механизма должен отвечать его основной задаче: обеспечению надежного и плотного соприкосновения всей поверхности щетки с рабочей поверхностью коллектора или кольца. Это необходимо для обеспечения допустимой плотности тока в месте контакта. Если указанная плотность превысит норму, щетка раскаляется до свечения, появляется *искрение,* которое постепенно вследствие эрозии разрушает поверхность контактных колец (или коллектора) и щетку. Скорость разрушения зависит от силы искрения, которое у машин постоянного тока делится на пять классов коммутации:

- 1 — отсутствие искрения, нет почернения на коллекторе и нагара на щетках;
- $1^1/_4$ — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки, не дающее почернения на коллекторе и нагара на щетках;
- $1^1/_2$ — слабое искрение под большей частью щетки, появление следов почернения на коллекторе, устранимых протиранием ветошью с бензином;
- 2 — искрение под всем краем щетки допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки, появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием бензином, на щетках — следы нагара;
- 3 — значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы; значительное почернение на коллекторе; подгар и частичное разрушение щеток.

*Коммутацией* в данном случае называется непрерывное переключение коллекторных пластин и связанных с ними секций при вращении ротора машины.

Очень сильное искрение может привести к явлению *кругового огня по коллектору,* под которым понимаются электрические дуги короткого замыкания между щетками разной полярности. Обмотка машины и питающая сеть в этом случае оказываются замкнутыми

## 16.10. Ремонт контактно-щеточного механизма

Ремонт контактно-щеточного механизма должен отвечать его основной задаче: обеспечению надежного и плотного соприкосновения всей поверхности щетки с рабочей поверхностью коллектора или кольца. Это необходимо для обеспечения допустимой плотности тока в месте контакта. Если указанная плотность превысит норму, щетка раскаляется до свечения, появляется *искрение,* которое постепенно вследствие эрозии разрушает поверхность контактных колец (или коллектора) и щетку. Скорость разрушения зависит от силы искрения, которое у машин постоянного тока делится на пять классов коммутации:

- 1 — отсутствие искрения, нет почернения на коллекторе и нагара на шетках;
- $1^1/_4$ — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки, не дающее почернения на коллекторе и нагара на щетках;
- $1^1/_2$ — слабое искрение под большей частью щетки, появление следов почернения на коллекторе, устранимых протиранием ветошью с бензином;
- 2 — искрение под всем краем щетки допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки, появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием бензином, на щетках — следы нагара;
- 3 — значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы; значительное почернение на коллекторе; подгар и частичное разрушение щеток.

*Коммутацией* в данном случае называется непрерывное переключение коллекторных пластин и связанных с ними секций при вращении ротора машины.

Очень сильное искрение может привести к явлению *кругового огня по коллектору,* под которым понимаются электрические дуги короткого замыкания между щетками разной полярности. Обмотка машины и питающая сеть в этом случае оказываются замкнутыми

накоротко. Круговой огонь по коллектору оплавляет щеткодержатели и медные пластины.

Для устранения искрения шеток от ЭДС самоиндукции секций используются дополнительные полюса, однако при неправильной их полярности они наоборот усиливают искрение. Чтобы избежать такого явления, следует соблюдать следующее правило.

Полярность добавочных полюсов машин постоянного тока, работающих *генератором*, должна быть такой же, как полярность главных полюсов, следующих за ними по вращению. Полярность добавочных полюсов-*двигателей* должна быть такой же, как полярность предыдущих по вращению главных.

Повышенное искрение щеток может быть также из-за неодинакового расстояния между щетками по периметру коллектора, неправильной установки траверсы, вибрации машины и щеточных пальцев, замыкания пластин коллектора, обрыва провода на пластине с повышенным искрением, плохой регулировки прижатия щеток к контактной поверхности. При этом слабое нажатие обусловливает повышенное искрение с указанными последствиями, а сверхсильное ускоренное — истирание деталей скользящего контакта. Рациональное нажатие щетки устанавливается по динамометру (рис. 102) в соответствии с указаниями инструкции по эксплуатации завода-изготовителя. Если такие данные отсутствуют, нажатие регулируется по искрению изменением давления пружины рычажка. Оптимальное нажатие – безыскровой режим работы щетки. У машин, работающих с повышенной вибрацией или с повышенной угловой скоростью вращения ротора, нажатие увеличивают.

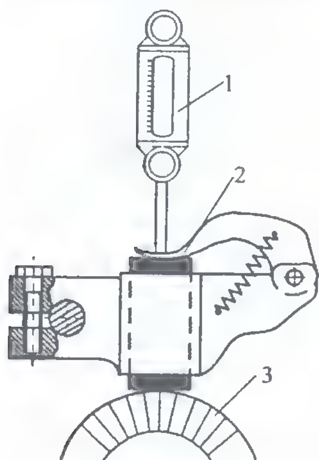


*Рис. 102.* Измерение усилия нажатия на щетку: *1* — динамометр; *2* — щетка; *3* — коллектор

Ремонт других основных неисправностей контактно-щеточного механизма выполняется следующими способами.

*Износ, разрушение или сильное выкрашивание щеток* устраняются заменой старых на новые. Сокращение от начальной высоты хотя бы одной щетки более чем на 50–40 % недопустимо. При этом замене подлежат все щетки, так как они должны быть одной марки, которая приводится в инструкции по эксплуатации. Если инструкция отсутствует, можно воспользоваться рекомендациями ГОСТа, делящими щетки на четыре группы:

- *графитные* (Г3, 611М, 611 ОМ) рекомендуются для генераторов и двигателей с облегченными условиями коммутации и контактных колец;
- *угольно-графитные* (Г20, Г21, Г22) — для генераторов и двигателей с облегченными условиями коммутации и коллекторных машин переменного тока;
- *электрографитизированные* (ЭГ2А, ЭГ2АФ, ЭГ4, ЭГ8, ЭГ14, ЭГ51, ЭГ61, ЭГ71, ЭГ74, ЭГ74АФ, ЭГ85) — для генераторов и двигателей со средними и затрудненными условиями коммутации и контактных колец;
- *металлографитизированные* (Ml, М3, М6, М20, МГ, МГ2, МГ4, МГС5, МГСО) — для низковольтных генераторов и контактных колец.

Для равномерной допустимой нагрузки током всей рабочей поверхности щетки каждая из них должна быть тщательно пришлифована к контактному кольцу или коллектору. Притирка выполняется стеклянной шкуркой, начиная от самой грубой и кончая самой мелкой. Нередко пользуются одной шкуркой с зернами средней крупности. Она располагается гладкой стороной к контактной поверхности машины, а зернами — к щетке. Прижимая шкурку *1* к кольцу или коллектору *2* по дуге, чтобы не срезать края щетки, ее протягивают, как показано на рис. 103. Заканчивается работа тщательной продувкой машины сжатым воздухом и проверкой качества пришлифовки на ее холостом ходу — вся поверхность щетки должна быть зеркальной. Запрещается для притирки использование наждачной шкурки, так как ее зерна въедаются в тело щетки и царапают медь контактов.

При отсутствии стандартных щеток их изготавливают из угольных или графитовых брусков, строго соблюдая требуемые разме-

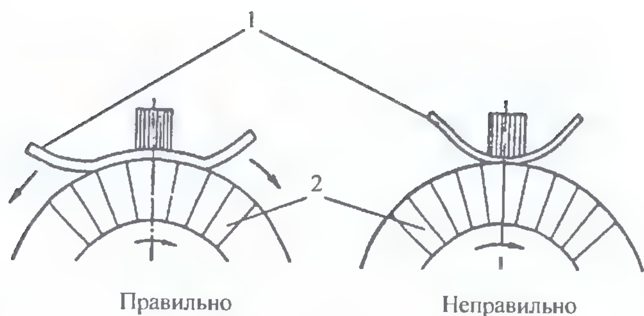



*Рис. 103.* Притирка щетки

ры. В этом случае токоведущий гибкий канатик щетки (из требуемого числа медных проволок диаметром не более 0,2 мм) не припаивается, а конопатится в высверленном отверстии. В нее после помещения конца канатика засыпается медный или бронзовый порошок, который зачеканивается.

*Неравномерный износ коллектора* устраняется сдвигом щеток относительно друг друга в осевом направлении.

*Оплавление, обгар щеткодержателей* ремонтируется зачисткой поврежденных мест, наваркой бронзы или латуни с требуемой механической обработкой.

*Механическое повреждение обойм* штампованных щеткодержателей ремонту не подлежит, их заменяют новыми. При клепанных конструкциях ремонт обычно связан с подтягиванием ослабевших заклепок.

*Износ* гнезд литых щеткодержателей устраняется путем наплавки на поверхность держателя слоя латуни с требуемой обработкой.

Ремонт щеткодержателей всех конструкций должен обеспечивать свободное без качки скольжение щеток в обоймах. Для этого зазоры между обоймой и шетками должны быть: при ширине щетки до 16 мм — в осевом направлении 0,2–0,5 мм, в направлении вращения — 0,06–0,3 мм, и при ширине щетки более 16 мм — в осевом направлении то же, в направлении вращения — 0,07–0,35 мм

*Ослабление пружин* не ремонтируют. Пружины заменяют новыми.

*Прожоги и выкрашивание изоляционных трубок пальцев траверсы* ликвидируют заменой на новые, изготовленные из тех же изолирующих материалов, что и старые.

Неисправные щеточные пальцы заменяют новыми стальными. Они прочно, неподвижно закрепляются в траверсе и располагаются параллельно оси машины. Для изоляции пальцев от траверсы используется формовочный миканит.

## 16.11. Балансировка роторов электрических машин

*Балансировкой* называется технологический процесс уравновешивания, т.е. совмещения центра массы всех вращающихся частей ротора машины с осью его вращения.

Смещение центра массы O′ относительно оси O (рис. 103) создает приложенную к нему центробежную силу *C*, величина которой определяется из выражения, Н:

$$C = m \cdot \omega^2 \cdot \rho, \qquad (80)$$

где $m$ — масса ротора, кг; $\omega$ — угловая скорость вращения ротора, $с^{-1}$; $\rho$ — расстояние смещения центра массы от оси вращения, м.

Из формулы (80) следует, что центробежная сила возрастает пропорционально квадрату угловой скорости и расстоянию смещения центра массы.

Вместе с тем к центру массы O′ приложена и сила *веса G* массы ротора, равная, Н:

$$C = m \cdot g,$$

$g$ — ускорение силы тяжести, м/с².

Из рис. 104 видно, что результирующая этих двух сил (*R*) при вращении ротора — величина переменная. Действительно, если в положении ротора (*I*) R имеет максимальное значение ($R' = C' + G'$) и

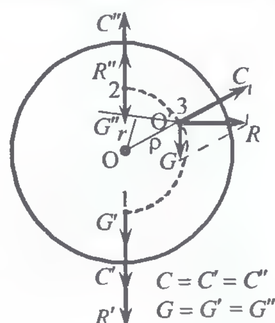



*Рис. 104.* Диаграммы сил, приложенных к центру массы ротора машины, при его вращении

равна сумме модулей векторов, то в положении (2) она минимальна, так как равна разности составляющих ($R'' = C'' - G''$).

Момент $M$ от суммы этих сил, воздействующий на центр массы ротора O′ (рис. 103), будет равен, Н·м:

$$M = R \cdot r, \tag{81}$$

где $r$ — плечо момента, м.

Поскольку $r$ так же, как $R$ — величина переменная (от 0 до $r_{max}$), то и момент $M$ будет переменным (от 0 до $M_{max}$).

*Приложение к ротору при его работе переменных сил вызывает вибрацию (сотрясение) его вращающихся частей и всей машины в целом.*

Вибрация отрицательно отражается на сроках службы всех деталей и узлов механической части электрической машины. Резко возрастает износ ее подшипников, шитов, корпуса. В них появляются трещины, разбиваются посадочные места подшипников с крышками, крышек с корпусом. Сотрясение передается на фундамент или агрегат, который машина приводит в действие, что может привести к их разрушению.

Отрицательно воздействует вибрация и на электрическую часть. Особенно, когда изоляция обмоток машины переходит по старению во второй класс. В ней образуются микротрещины, создающие условия для проникновения в изоляцию влаги, а это значительно понижает не только ее сопротивление, но и электрическую прочность.

В зависимости от условий работы и, следовательно, допустимого уровня вибрации, для электрических машин предусматриваются три класса точности уравновешивания: нулевой — для машин с повышенными требованиями к уровню вибрации (точные приборы и пр.); первый — для машин малошумных и машин с высокой точностью вращения (бытовое оборудование, станки и т.п.); второй — для машин с обычными, нормальными требованиями к вибрации.

Как показывают выражения (80), (81), для ликвидации вибрации требуется, чтобы центробежная сила $C$ и переменный момент

*М* были равны нулю, т.е. чтобы были равны нулю смещение ρ и плечо *r*. А это значит, что требуется совместить центр массы ротора машины с осью их вращения. Совмещение делается с помощью специальных балансировочных грузов.

Балансировка роторов электрических машин заключается в подборе нужной массы груза и определении места его расположения на роторе. Она выполняется двумя методами: *статическим и динамическим.*

Статической балансировке подвергаются роторы всех электромашин независимо от их параметров. А динамической (после статической) — роторы скоростных электрических машин повышенной мощности с большими маховыми массами и большой длины.

*Статическая балансировка роторов* производится на призмах (*1*) (рис. 105) — двух массивных линейках (*4*) из закаленной стали, установленных параллельно друг другу и строго горизонтально, отклонение не должно превышать 0,02 мм на 1 м длины линеек. Требуемая ширина рабочей поверхности, призмы δ зависит от: *m* — массы ротора балансируемой машины, кг; *E* — модуля упругости материала призмы, МПа; σ — допускаемого напряжения на смятие, МПа; *d* — диаметра шейки вала, мм; *g* — ускорение 9,81 м/с$^2$. Рассчитывается по формуле, мм:

$$\delta = \frac{0{,}35 \cdot m \cdot g \cdot E}{\sigma^2 \cdot d}.$$

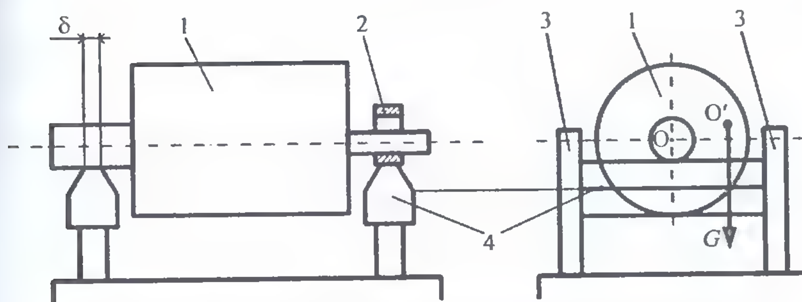



*Рис. 105.* Установка для статической балансировки роторов на призмах

Для закаленной стали при $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma = 700–800$ МПа и при усредненных шейках вала (с достаточной степенью точности) рабочая ширина поверхности призмы $\delta$ (мм) зависит от массы ротора $m$ (кг) следующим образом: 0,3 — до 3; 3 — 3–30; 10 — 30–300; 30 — 300–2000.

Рабочая поверхность тщательно шлифуется, на концах призм делаются ограничители (рис. 105, *3*) для предохранения ротора от скатывания.

*Порядок операций балансировки:*

а) проводится сборка всех вращающихся частей ротора (*1*);

б) в таком виде его укладывают шейками вала на линейки (*4*). Если диаметры шеек разные, то для выравнивания оси ротора относительно к горизонтали на шейку с меньшим диаметром устанавливают кольцо (*2*) нужной толщины;

в) освобождают ротор. Если центр O′ массы $m$ смещен относительно оси вращения O, то ротор под действием силы веса $G$ самопроизвольно проворачивается и после нескольких колебаний устанавливается с центром O′ неуравновешенной *массы под осью* O;

г) устанавливается контрольный балансировочный груз в верхней части ротора *над осью*;

д) проворачивают ротор и освобождают его, если он опять самопроизвольно проворачивается, изменяют массу груза (в небольших пределах можно скорректировать его положение), добиваясь, чтобы в любом зафиксированном положении ротор оставался неподвижным (обычно для контроля его фиксируют, проворачивая на линейках на углы 60, 120, 180, 240, 300°).

е) сваркой, винтом или каким-либо другим методом закрепляют рабочий балансировочный груз (его масса должна учитывать массу крепления.).

Для асинхронных машин 1–4 габаритов допускается снимать лишнюю массу $m$ в торцах магнитопровода или путем снятия ее с кончиков крыльев вентиляции, на короткозамыкающих кольцах роторной обмотки, с внутренней стороны треугольными кусочками, но не более чем 15×15 мм.

Для 5–9 габаритов электромашин балансировка выполняется только с помощью балансировочных грузов.

При больших массах роторов (*1*) более точный результат дает статическая балансировка на вращающихся роликах (*2*) (рис. 106) с подшипниками качения, размеры которых: диаметр $D$ и рабочая ширина $b$ выбираются в зависимости от массы ротора. Для $m$ до 250 кг $D$ берется равным 100 мм, $b$ — 40 мм.

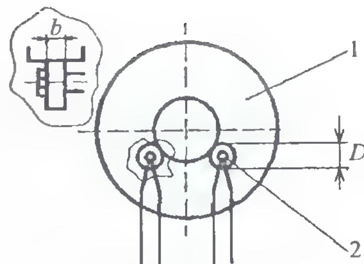



*Рис. 106.* Статическая балансировка на роликах

Но не всегда статическая балансировка дает возможность провести качественное уравновешивание ротора. Вибрация может вызываться не только смещением его центра массы относительно оси вращения. Она также может быть вызвана образованием пары сил вследствие симметричного смещения масс по торцам длинного ротора относительно той же оси (рис. 107). В таком случае установить наличие смещения центров масс рассмотренным методом и провести балансировку не представляется возможным, так как статически такой ротор уравновешен. Однако во время работы электромашины указанные силы воздействуют на подшипники с переменной нагрузкой. Момент пары сил определяется по формуле, Н·м:

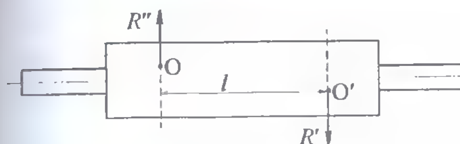



Рис. 107. Динамическая неуравновешенность

$$M = R \cdot l, \qquad (82)$$

где $l$ — плечо пары сил, м.

Исходя из выражения (82) для устранения вибрации в этом случае необходимо, чтобы сила $R$ или плечо $l$ были равны нулю. Значит, требуется выполнить уравновешивание ротора при его вращении.

*Динамическая балансировка* имеет ту же цель, что и статическая – определение масс балансировочных грузов и установление мест их расположения на торцах ротора для оказания противодействия паре сил. Балансировка выполняется на специальных станках (рис. 108).

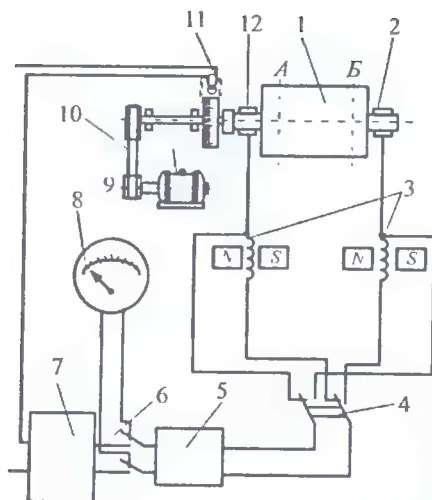



*Рис. 108.* Схема станка для динамической балансировки: *1* — балансируемый ротор; *2, 12* — подшипники; *3* — катушки; *4, 6* — переключатели; *5, 7* — усилители; *8* — указатель; *9* — эл. двигатель; *10* — передача; *11* — стробоскоп

Балансируемый ротор устанавливается в подшипники на пружинных опорах. Передачей он соединяется с электродвигателем, который приводит ротор во вращение. Под действием пары сил от его неуравновешенности подшипники раскачиваются и приводят в колебательное движение катушки. В их витках от пересечения поля постоянных магнитов (*N–S*) индуктируется электродвижущая сила, пропорциональная величине колебаний. Переключателем через усилитель она подается на указатель, а затем переключателем — в цепь стробоскопа.

По величине показания прибора определяется предварительная масса балансировочных грузов. По стробоскопу устанавливаются места их целесообразного расположения. Затем, меняя массу грузов по указателю, добиваются снижения вибрации до допустимой неуравновешенности для каждой из сторон φ, кгс·мм:

$$\varphi = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot m \cdot e,$$

где $m$ — масса ротора, кг; $e$ — допустимая удельная остаточная неуравновешенность, мкм. Ее зависимость от массы ротора и частоты вращения:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Частота вращения ротора, мин$^{-1}$ | 750 | 1000 | 1500 | 3000 |
| Малые роторы, $e$ | 40 | 30 | 20 | 10 |
| Средние роторы, $e$ | 80 | 60 | 40 | 20 |

Балансировка проводится вначале с одной стороны ротора (в плоскости А), а затем с другой (в плоскости Б), так что балансировочные грузы, как правило, размещаются с обеих его сторон.

При отсутствии специального станка в малых мастерских нередко динамическая балансировка делается на прочных деревянных брусьях, уложенных на резиновые прокладки.

Качество балансировки окончательно проверяется после сборки электромашины. Для этого она помещается на гладко струганой плите и включается. При холостом ходе с номинальной частотой вращения машина не должна иметь качаний и самопроизвольного перемещения.

Таким образом, профилактическое проведение балансировки роторов (при выполнении ремонтных работ на электрических машинах) значительно удлиняет в хозяйствах срок их службы.

# Глава 17. Сборочные работы

Сборочные работы проводят в отделении сборки ремонтного предприятия. Оборудование его во многом похоже на оборудование разборочного отделения. Небольшие отличия чаше всего связаны со специальными приспособлениями. Вот почему во многих цехах и мастерских эти отделения объединяются в одном помещении.

Отдельные узлы: роторы, контактные кольца, коллекторы, контактно-щеточные механизмы, полюса машин постоянного тока и т.п. собираются на специально выделенных участках отделения.

Следует отметить, что при сборке машин нередко используются не только детали и узлы ремонтируемой электромашины, в том числе и восстановленные, но и заново изготовленные самим ремонтным предприятием или полученные как запасные части от заводов-изготовителей. Применяются также и работоспособные детали от аналогичных ремонтонепригодных машин.

Для своевременного определения неисправностей и недопущения брака в конце на каждой последующей операции технологического процесса ремонта электромашин проверяется качество выполнения предыдущей работы. Такой *контроль* называется *межоперационным.*

Сборка электрических машин также начинается с межоперационного контроля. Для этого персонал должен хорошо знать все требования и нормы, которые предъявляются ко всем их составным частям. Основные требования изложены ранее при рассмотрении отдельных операций технологии ремонта. В данном разделе даны только дополнительные условия.

*Требования к деталям при их сборке.* Все детали, идущие на сборку, должны быть чистыми и по всем параметрам входить в пределы норм. Если имеются повреждения лакокрасочных покрытий, то перед сборкой они должны быть восстановлены. Крепежные детали (в первую очередь их резьбовые и трущиеся поверхности) — смазаны.

*Статор* асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором состоит из корпуса, магнитопровода, обмотки, клеммной коробки с выводами и щитов с подшипниками. Требования к этим узлам и деталям следующие.

*Корпус машины.* Рым-болт корпуса должен быть ввернут на все витки резьбы до упора. Все места сварок зачищены и залакированы.

Допустимое *радиальное биение* поверхности посадочных мест под подшипниковые щиты относительно поверхности расточки сердечника зависит от высоты оси вращения ротора и должно отвечать следующим нормам: для высоты оси 56–100 мм — не более 0,003 мм, для 112–180 мм — 0,05 мм, для 200–350 мм — 0,1 мм.

*Магнитопровод* должен быть тщательно спрессован и надежно закреплен в корпусе. Распушение (расслоение) $\delta = l_П - l_А$ не должно быть более указанного. $l_П$ — длина (толщина) пакета магнитопровода, измеренная по спинке статора (дну паза), мм; $l_А$ — длина того же пакета, измеренная по зубцам в расточке, мм. Допустимые значения распушения магнитопровода: до 100 — 2; 101–150 — 3; 151–250 — 4; 251–400 — 5; 401–500 — 6.

*Обмотки.* Перекосы изоляции относительно паза недопустимы. Пазовые коробочки должны надежно прикрывать острые края пазов магнитопровода и выступать из них не менее, чем: а) для серии асинхронных двигателей А2 — на 2–3 мм; б) для серии 4А в зависимости от мощности: до 5,5 кВт — на 10 мм, до 40 кВт — на 15 мм и до 100 кВт — на 20 мм.

Все активные стороны секций обмоток должны быть надежно заклинены в пазах, переходы активных частей секций в лобовые выполнены плавно с наклоном в сторону станины в пределах 6–8°, резкие изгибы проводов не допускаются.

Лобовые части должны быть тщательно отформованными и равномерно по окружности забандажированы, основные габаритные размеры должны соответствовать нормам. В противном случае установка подшипниковых щитов может стать невозможной. К тому же лобовые части обмотки машины должны быть покрыты эмалью. Изолирующие трубки на переходных витках и концах катушечных групп должны заходить в пазовую коробочку не менее чем на 3 мм.

*Клеммная коробка.* При подрезе изоляции выводных проводов нельзя допускать снижения общего сечения медной жилы. Наконечники их должны быть надежно пропаяны.

*Ротор* асинхронного двигателя включает вал, магнитопровод, короткозамкнутую обмотку и вентилятор. Требования к узлам и деталям:

*магнитопровод* перед сборкой проверяется на *биение* поверхности «бочки». Допустимое биение зависит, в первую очередь, от серии двигателя:

а) для серии А2 относительно оси вращения, также с учетом числа оборотов ротора не должно превышать: при 750 об/мин — 0,16 мм, при 3000 об/мин — 0,06 мм;

б) для серии 4А — относительно посадочных мест под подшипники и в зависимости также от высоты оси вращения ротора: допустимое биение при высоте оси 56–100 мм и 280–355 мм — не более 0,03 мм, при высоте 112–180 мм — 0,01 мм, при 200–250 мм — 0,05 мм.

*Вал.* Овальность и конусность поверхности посадочных мест под подшипники для серии А2 не должна превышать 0,01 мм, для серии 4А в зависимости от высоты оси вращения ротора: при 56–100 мм — не более 0,006 мм, при 112–355 — не более 0,01 мм.

*Вентилятор.* Радиальное биение поверхности посадочного места под вентилятор не должно превышать 0,05 мм.

*У фазного ротора* изоляционные коробочки должны, как и у статора, надежно прикрывать острые края пазов и выступать из них не более чем на 3 мм; активная часть секций должна быть заклинена; на лобовые — наложены бандажи; выводные концы катушечных групп выведены только с их наружной стороны.

После межоперационного контроля детали, если в этом есть необходимость, поступают на соответствующие участки для сборки дополнительных узлов. Технологии сборок с достаточной полнотой изложены ранее.

Общая сборка осуществляется на специализированном участке, куда поступают все устанавливаемые на данной машине основные и дополнительные узлы, а также отдельные детали. Они должны соответствовать действующим техническим требованиям.

Для сокращения трудоемкости работ, повышения качества их выполнения необходимо широко использовать специальные приспособления и оправки. Категорически запрещается при выполнении операций ударять стальным молотком непосредственно по деталям и другим частям машин. При перемещении деталей с помощью таких молотков следует использовать прокладки из мягких материалов (дерева, текстолита, алюминия и т.п.). Детали, сопрягаемые между собой с натягом, следует соединять методами, исключающими повреждения посадочных мест, как описано выше.

Последовательность операций сборки зависит от типа и конструкции электрической машины, но теперь она выполняется в обратном порядке разборки. Все части машины устанавливаются без перекосов и повреждений посадочных поверхностей.

При введении ротора в расточку статора максимальное внимание уделяется предохранению от повреждений обмоток и поверхностей магнитопровода статора и ротора. Резьба деталей соединения покрывается антикоррозийной смазкой, затяжка шпилек и болтов выполняется равномерно. Концы шпилек должны выступать из гаек на 2–3 мм. Камеры подшипниковых узлов заполняются смазкой на 2/3 объема.

Траверса щеткодержателя фазного ротора асинхронной машины устанавливается по метке. Особое внимание обращается на рас-

стояние от обоймы щеткодержателя до поверхности контактных колец, так как это влияет на устойчивость щетки при ее работе, оно должно быть не более 2–4 мм. Разность усилий нажатия пружин на отдельные щетки должна находится в пределах 10 %. Кожух вентилятора следует надежно закреплять на корпусе и обеспечивать требуемое охлаждение поверхности электромашины.

После сборки электрических машин их роторы должны вращаться свободно от руки, без задевания подвижных частей за неподвижные и заедания в подшипниках.

У асинхронных машин отклонение от параллельности оси вращения валов относительно опорной плоскости допускается не более 0,15 мм на 0,1 м длины, так как оно вызывает искажение распределения магнитного потока в воздушном зазоре.

Радиальное биение поверхности выходного вала относительно оси вращения допускается: для серии АИ у машин 1–5 габаритов — не более 0,05 мм, у 6–9 габарита — 0,06 мм; для серии 4А в зависимости от оси вращения ротора — 0,04 мм – 0,06 мм.

В случаях нарушения при сборке асинхронных двигателей указанных норм проводится дополнительная регулировка и подгонка всех деталей и узлов электрических машин.

# Глава 18. Испытания электрических машин после ремонта и методика их проведения

В соответствии с ГОСТом 183–74 машины электрические вращающиеся должны подвергаться следующим испытаниям: приемочным, приемосдаточным, периодическим.

После капитального ремонта каждая электрическая машина подвергается приемосдаточным испытаниям в объеме и по методикам, изложенным в ГОСТах для различных типов машин.

*Цель испытаний* — выявление допущенного при ремонте брака, снятие характеристик и определение параметров, имеющих важное значение в эксплуатации.

Испытания проводятся на специально выделенном участке, обеспечивающим надежную защиту обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Для этого на нем устанавливаются ограждения с блокировочными устройствами и прочим оборудованием, защищающим человека. Желательно, чтобы этот участок был оборудован стандартной контрольно-испытательной установкой типа КИУ (КИУ-1, КИУ-1М, КИУ-7, КИУ-10 или аналогичной), с приборами класса точности не ниже 0,5. При отсутствии готовой установки она собирается на ремонтном предприятии с учетом проводимых испытаний.

По ГОСТу 183–74 *асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором* подвергаются *приемосдаточным испытаниям в* следующем объеме:

1) внешний осмотр, проверка качества сборки и комплектности;

2) измерение сопротивления изоляции обмоток от корпуса и относительно друг друга;

3) измерение сопротивления обмоток постоянному току практически в холодном состоянии;

4) испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса и (при возможности) между обмотками разных фаз повышенным напряжением;

5) испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность повышенным напряжением;

6) измерение силы тока и потерь на холостом ходу двигателя;

7) определение силы тока и потерь короткого замыкания при токе, близком к номинальному;

8) проверка маркировки, упаковки и комплектности необходимой сопроводительной документации.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором после пункта 3 еще находится коэффициент трансформации.

В случаях сомнений в качестве ремонта механической части электродвигателя проводится дополнительное испытание при повышенной частоте вращения ротора.

Методики проведения испытаний, схемы и расчеты установлены для асинхронных машин ГОСТом 7217–87 и в данном разделе они приводятся с учетом ранее изложенного материала.

## 18.1. Внешний осмотр, проверка качества сборки и комплектности

Цель данного пункта испытания — проверка отремонтированного двигателя *на укомплектованность* положенными узлами, деталями и всеми необходимыми метизами, предусмотренными конструкцией.

Качество сборки проверяется по легкости вращения вала от руки, по притертости щеток (они должны плотно прилегать к кольцам всей контактной поверхностью), по соответствию состояния машины ранее приведенным нормам. При обнаружении во время осмотра каких-либо дефектов продолжение испытаний двигателя запрещается.

## 18.2. Измерение сопротивления изоляции обмоток

Измерение сопротивления делается с целью *проверки качества изоляции*. Оно замеряется между корпусом и обмотками, а также обмотками разных фаз относительно друг друга. Для машин с напряжением до 0,66 кВ сопротивление измеряется мегомметром с напряжением 1000 В (методика измерения подробно описана выше).

В соответствии с требованиями ПТЭ величины сопротивлений обмоток статоров машин переменного тока *после капитального ремонта* должны быть в практически холодном состоянии (10–30°С), не менее 1 МОм. При межоперационном контроле после пропитки по действующим техническим условиям ремпредприятий сопротивления обмоток зависят от класса нагревостойкости изоляции и должны быть: 4 МОм для класса $A$ и $B$, 8 МОм — для $F$.

По окончании измерения сопротивления каждую электрически независимую цепь следует разрядить на заземленный корпус. Причинами пониженного сопротивления изоляции обмоток относи-

тельно указанных норм могут быть плохая пропитка, повышенная влажность, загрязнения, механические повреждения, неправильный подбор изоляционных материалов и т.п.

## 18.3. Измерение сопротивления обмоток постоянному току

Оно проводится в практически холодном состоянии непосредственно на их выводах мостом постоянного тока (Р-333 или др.) по схеме (рис. 109). Может выполняться методом вольтметра и амперметра (по закону Ома). При этом разница между температурами окружающей среды и обмоток не должна быть более ±3°С.

*Рис. 109.* Схема для определения сопротивления обмотки: *1* — обмотки машины; *2* — мост постоянного тока

Цель измерения — *сравнением полученных величин сопротивлений* обмоток с расчетными (или стандартными для данной машины по ГОСТу) *решить ее пригодность к эксплуатации или установить причины расхождения.*

Причинами отклонений могут быть: плохая пропайка или сварка соединений в обмотках, плохая затяжка контактов выводов, крупные витковые замыкания, отклонения сечений обмоточных проводов от расчетных и т.п.

Значения замеров не должны отличаться от расчетных (стандартных) более чем на ±5 %. Для большей достоверности результатов замеры сопротивлений для каждой обмотки делаются не менее трех раз при различных величинах тока с определением средней. Различие средних сопротивлений обмоток разных фаз не должно быть более 1 %. В противном случае проводятся повторные измерения (выясняются причины) .

В современных машинах (АИР и др.) нередко фазные обмотки статора имеют внутренние соединения в «звезду» или «треугольник». Тогда в коробке на щитке имеются только три вывода. В таких случа-

ях сопротивления обмоток фаз *A*, *B* и *C* ($R_A$, $R_B$, $R_C$) определяются по замеренным сопротивлениям обмоток между выводами $C_1$-$C_2$ – $R_{AB}$, $C_2$-$C_3$ – $R_{BC}$, $C_3$-$C_1$ – $R_{CA}$.

*При соединении обмоток в «звезду»* (Y) (так как между выводами $C_N$-$C_N$ две обмотки соответствующих фаз соединены последовательно) можно записать:

$$R_{AB} = R_A + R_B, \quad R_{BC} = R_B + R_C, \quad R_{CA} = R_C + R_A. \tag{83}$$

Решая уравнения (83) , получим:

$$R_A = \frac{R_{CA} + R_{AB} - R_{BC}}{2}, \qquad R_B = \frac{R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}}{2},$$

$$R_C = \frac{R_{BC} + R_{AC} - R_{AB}}{2}.$$

В частном случае, когда $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R$, имеем

$$R_A = R_B = R_C = 0{,}5R.$$

*При соединении обмоток в «треугольник»* (Δ), так как между выводами $C_N$-$C_N$ обмотки соединены в две ветви, причем в одной из них сопротивление обмотки одной фазы, а в другой — двух последовательно соединенных обмоток оставшихся фаз, можно записать:

$$R_{AB} = \frac{1}{1/R_A + 1/R_B + R_C} = \frac{R_A(R_B + R_C)}{R_A + R_B + R_C},$$

$$R_{BC} = \frac{1}{1/R_B + 1/R_A + R_C} = \frac{R_B(R_A + R_C)}{R_A + R_B + R_C}, \tag{84}$$

$$R_{CA} = \frac{1}{1/R_C + 1/R_B + R_A} = \frac{R_C(R_B + R_A)}{R_A + R_B + R_C}.$$

Решение уравнений (84) дает следующие выражения для определения сопротивлений обмоток фаз:

$$R_A = 0{,}5 \cdot \left[\frac{4R_{BC}R_{CA}}{R_{BC} + R_{CA} - R_{AB}} - (R_{BC} + R_{CA} - R_{AB})\right],$$

$$R_B = 0.5 \cdot \left[ \frac{4R_{AB}R_{CA}}{R_{AB} + R_{CA} - R_{BC}} - \left(R_{AB} + R_{CA} - R_{BC}\right) \right],$$

$$R_C = 0.5 \cdot \left[ \frac{4R_{BC}R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}} - \left(R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}\right) \right],$$

В частном случае, когда $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R$, имеем

$$R_A = R_B = R_C = 1{,}5R.$$

У асинхронных машин с фазным ротором измерение сопротивления обмоток роторов делается между контактными кольцами соответствующих фаз, когда ротор находится в покое.

В машинах постоянного тока сопротивление обмоток якоря замеряется между коллекторными пластинами, отстоящими друг от друга на расстоянии полюсного деления, при поднятых щетках.

## 18.4. Испытание электрической прочности изоляции обмоток

У электрических машин такое испытание прочности изоляции обмоток выполняется повышенным напряжением.

Цель испытания — проверка *надежности изоляции обмоток в целом и пофазно* относительно заземленного корпуса и между собой. Проверка проводится не только у электрических машин с замененной изоляцией, но также и для машин с изоляцией, оставленной для дальнейшей эксплуатации.

При внутреннем соединении обмоток трехфазных машин в схему (Y или Δ) наружу выведены только три вывода обмоток. Во время испытания они соединяются между собой перемычкой накоротко и вся обмотка считается одной электрической цепью. К ней для проверки прочности ее изоляции относительно корпуса прикладывается испытательное напряжение от контакта установки для испытания. Если же на клеммную панель выведены все шесть концов фазных обмоток, испытательное напряжение подводится к выводу одной из них, две другие соединяются между собой и с зазем-

ленным корпусом — проверяется электрическая прочность изоляции первой обмотки относительно корпуса и других обмоток. Затем, поочередно переключая испытательное напряжение на выводы обмоток оставшихся фаз, аналогично проверяют электрическую прочность их изоляции.

Указанные испытания выполняют при неподвижном положении ротора машины в практически холодном состоянии (10–30°С). Испытательное напряжение должно быть синусоидальным с частотой 50 Гц и отвечать нормам ГОСТа.

*В случаях, когда электрическая машина ремонтируется без смены старых обмоток, испытательное напряжение берется равным 130 % от номинального.*

**Величины испытательных напряжений электрических машин**

| Характеристика электромашины или ее части | Испытательное напряжение $U_{ИС}$ |
|---|---|
| 1. Электродвигатель мощностью менее 1 кВт на номинальное напряжение 110 В | 500 В плюс двукратное номинальное напряжение |
| 2. Электродвигатель мощностью от 1 кВт и выше на номинальное напряжение ниже 100 В | 1000 В плюс двукратное номинальное напряжение |
| *3. Электродвигатель мощностью до 1000 кВт на номинальное напряжение свыше 100 В* | *1000 В плюс двукратное номинальное напряжение, но не менее 1500 В* |
| 4. Обмотки роторов электродвигателей с фазным ротором, предназначенным для торможения противовключением | 1000 В плюс четырехкратное номинальное напряжение обмоток роторов |
| 5. Обмотки роторов, не предназначенные для включения торможения противовключеиием | 1000 В плюс двукратное номинальное напряжение обмоток роторов |

**Примечание.** Выделено значение испытательного напряжения для асинхронных машин с номинальным напряжением 380/220 В.

Изоляцию электромашин испытывают на специальной высоковольтной установке по схеме рис. 110. Последовательность проведения испытания следующая: включаются коммутационные аппараты *QF* и *QS*. При этом начальное испытательное напряжение на вольтметре не должно быть более одной трети его максимального

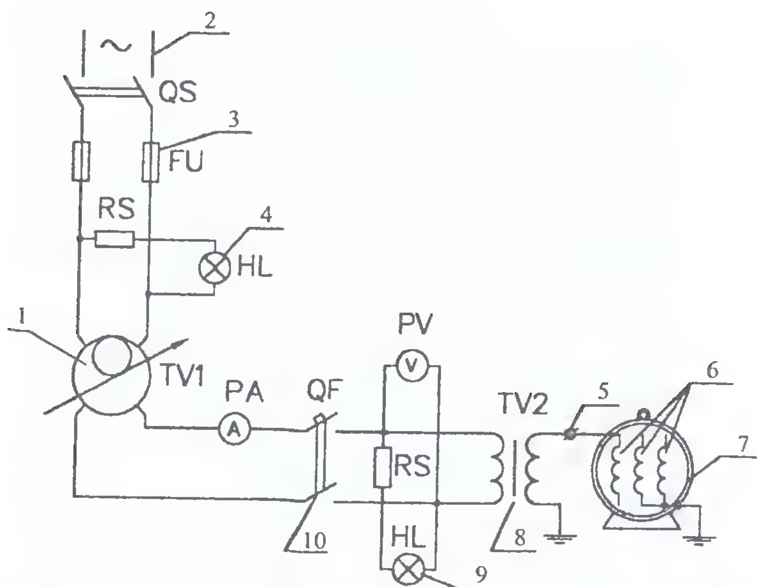



*Рис. 110.* Принципиальная схема установки для испытания электрической прочности изоляции электромашин: *1* — автотрансформатор; *2* — источник питания; *3* — предохранитель; *4, 9* — сигнальные лампы; *5* — контакт для подключения испытуемого объекта; *6* — фазные обмотки; *7* — заземленный корпус машины; *8* — высоковольтный трансформатор; *10* — автоматический выключатель

значения. Затем напряжение с помощью потенциал-регулятора (*1*) плавно (в течение 10–15 с) повышают до максимума.

Выдерживают в течение 60 с (1мин). Если в этом интервале не происходит пробоя, перекрытия или ускоренного нагрева изоляции, изменения тока утечки результат испытания считается удовлетворительным.

Испытательное напряжение также плавно снижают до 30–35 % от максимального и отключают. Причинами пробоя или других нарушений изоляции обмоток при испытании в основном могут быть: неправильный подбор изоляционных материалов (по роду, качеству, толщине и т.п.), механические повреждения изоляции при ремонте, плохая пропитка и прочее.

При испытании прочности изоляции машин постоянного тока обмотку якоря с последовательно соединенными с ней обмотками

на полюсах следует принимать за независимую цепь. Обмотки главных полюсов, включенных параллельно с обмоткой якоря, считаются также независимыми цепями.

Для исключения ошибок при испытании электрической прочности изоляции контактно-щеточных механизмов следует удалить со всех деталей угольную пыль.

## 18.5. Испытание межвитковой изоляции обмоток

Испытание на электрическую прочность межвитковой изоляции обмоток у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выполняется повышенным напряжением.

Цель испытания — *проверка надежности изоляции между смежными витками* в секциях. Проводится на вращающейся машине, включенной по схеме рис. 111 (наличие ваттметров не обязательно). После того, как ротор двигателя (*8*) развернулся на холостом ходу до номинальной скорости вращения, подводимое к нему напряжение по вольтметрам (*5*) устройством (*4*) плавно повышается на 30 % выше номинального и выдерживается в течение 3 минут. Продолжительность испытаний сокращают до 1 мин, если ремонт машины выполнен без смены ее изоляции. После испытания напряжение плавно понижается до номинального. При наличии или появлении короткого замыкания в витках меняется звук работы машины, может появиться дым, стрелки на амперметрах (7) «прыгают». В этом случае ее немедленно отключают. Такая машина к работе не пригодна.

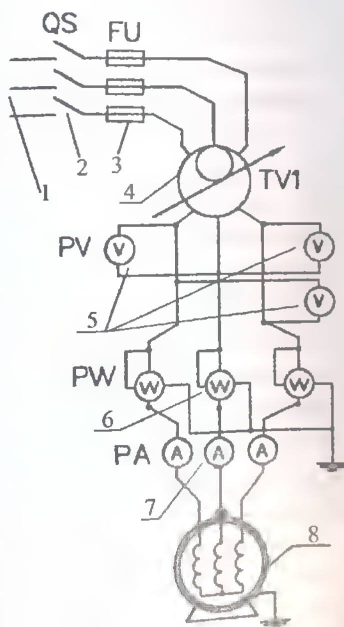


*Рис. 111.* Схема испытания межвитковой изоляции обмотки машины

Причины витковых замыканий связаны с качеством изоляции обмоточных проводов (особенно, если они проходили восстановление), механическими повреждениями изоляции проводов при их укладке в пазы и т.п.

У трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором испытание электрической прочности витков обмоток ротора проводится при его неподвижном и разомкнутом состоянии.

## 18.6. Измерение силы тока и потерь на холостом ходу

Ток асинхронного двигателя измеряется в режиме ненагруженной машины при установившемся тепловом состоянии частей (в частности, подшипниковых узлов). Замеры выполняются на установке, собранной по схеме рис. 111. Цель испытания — определение *качества ремонта электрической машины и ее параметров*, имеющих важное значение в эксплуатации.

Правильность результатов опыта холостого хода в значительной степени зависит от качества электроэнергии источника питания. В связи с этим очень важно соблюдение следующих требований: подводимые к испытуемому электродвигателю линейные напряжения должны быть симметричными, кривая напряжения — синусоидальной, а частота тока — устойчивой.

При опыте холостого хода в цепи статора замеряются: линейные напряжения ($U_{X.X}$), линейные токи ($I_{X.X}$), мощность ($P_{X.X}$), частота тока ( $f$) , если она неустойчива. Для получения результатов повышенной точности целесообразно использовать приборы со шкалами, отвечающими величинам измерений, а для измерения мощности дополнительно желательно использовать малокосинусные ваттметры, включенные во все три фазы.

Порядок проведения опыта: испытуемая машина (*8*) аппаратом (*2*) включается на номинальное напряжение источника питания (*1*) и до начала испытания, для прогрева вращается в течение 5–30 мин (в зависимости от мощности); затем автотрансформатором (*4*) напряжение, определяемое по вольтметрам (*5*), поднимается до 130 %

от $U_н$. Для этой точки снимаются показания ваттметров (*6*) и амперметров (*7*). После чего напряжение плавно понижают до начала возрастания тока статора. При этом для различных его значений по приборам *PV* делают еще 8–10 промежуточных измерений с фиксацией показаний приборов *PA* и *PW* (при $U_н$ показания снимаются обязательно). Затем двигатель отключается от сети и проводится замер омического сопротивления обмотки двигателя между двумя линейными выводами — $R_{о.л}$.

В тех случаях, когда система линейных напряжений несимметрична, действительной величиной напряжения холостого хода $U_0$ считают их среднеарифметическое значение, В:

$$U_0 = 1/3(U_{AB.XX} + U_{BC.XX} + U_{CA.XX}). \qquad (85)$$

По ряду причин (несимметрии напряжения и пр.) линейные токи по фазам, как правило, имеют расхождение, поэтому за действительный ток холостого хода $I_0$ принимается среднее значение трех фаз А:

$$I_0 = 1/3(I_{A.XX} + I_{B.XX} + I_{C\,XX}). \qquad (86)$$

За потери холостого хода двигателя $P_0$ принимается величина, определенная по формуле, кВт:

$$P_0 = P_{A.XX} + P_{B.XX} + P_{C.XX}.$$

По данным испытания определяется коэффициент мощности холостого хода (cosφ)

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0}.$$

Для более глубокого анализа состояния двигателя после ремонта потери холостого хода $P_0$ разделяют на: потери в обмотке статора $P_М$, сумму потерь в стали ($P_{СТ}$) и механические ($P_{МЕХ}$) Потери в обмотке статора составляют, кВт:

$$P_М = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_0 \cdot 10^{-3},$$

где $R_0$ — омическое сопротивление меди обмотки одной фазы двигателя, Ом; но так как $R_0$ = 1/2 $R_{О.Л}$, потери $P_М$ можно также определять из выражения

$$P_М = 1{,}5 \cdot I_0^2 \cdot R_{О.Л} \cdot 10^{-3}.$$

Зная потери в обмотке статора от тока холостого хода и подведенную к двигателю мощность $P_0$, сумму потерь в стали с механическими потерями находят по формуле, кВт:

$$P_{СТ} + P_{МЕХ} = P_О - P_М.$$

Если испытание проводилось при частоте тока, отличной от номинальной на 2–5%, результаты опыта приводятся к номинальной частоте по выражениям:

- скорректированное напряжение холостого хода, В:

$$U_0 = \frac{f_H}{f_H \pm \Delta f} U_0',$$

где $f_Н$ — номинальная частота тока, Гц; $\Delta f$ — величина, на которую измеренная частота отличается от номинального значения, Гц; $U_0$ — значение напряжения, при котором измерены токи холостого хода, В;

- скорректированная мощность холостого хода, кВт:

$$P_0 = \frac{f_H}{f_H \pm \Delta f} P_0'.$$

По результатам опыта холостого хода строят кривые зависимостей $I_0$, $P_0$, $P_М$, $P_{СТ} + P_{МЕХ}$, $\cos\varphi = f(U_0)$, которые сравниваются с кривыми заводов-изготовителей.

*Однако в ремонтной практике чаще проводятся сравнения с заводскими только следующих величин: сопротивления обмотки ($R_0$), тока ($I_0$) и потерь ($P_0$) холостого хода при номинальном напряжении. Указанные показатели ($R_0$, $I_0$, $P_0$) для асинхронных двигателей ГОСТами не нормированы, но* ***отклонения значений силы тока от заводских допускаются только на 10 %, а значений потерь холостого хода — на 15 %.***

При больших отклонениях указанных величин проводится анализ причин, в частности, с учетом приведенных формул, например:

- *увеличение тока холостого хода* при нормальных потерях холостого хода может быть следствием старения электротехнической стали, увеличенного воздушного зазора (чаще всего при

поверхностной проточке магнитопровода ротора), результатом сокращения числа витков при укладке обмотки в пазы, недобора листов стали при перешихтовке сердечника или максимального смещения ротора по отношению к статору и пр.

- *высокая неравномерность токов по фазам* при практически симметричной системе линейных напряжений может вызываться неравномерностью зазора по окружности статора (в частности, при установке ротора с перекосом), различием числа витков в обмотках фаз и т.п.
- *повышенные потери холостого хода* при нормальном токе холостого хода чаще всего вызываются механическими причинами: повышенное трение в подшипниках, неправильная посадка вентилятора и т. п.

При опыте холостого хода у двигателей с фазным ротором обмотка ротора замыкается накоротко на его выводах.

## 18.7. Определение силы тока и потерь короткого замыкания

Измерения проводятся при токе, близком к номинальному. Производят их на той же установке, собранной по схеме (рис. 111) при заторможенном роторе.

Цель испытания – проверка *качества ремонта электрической машины и ее параметров*, имеющих важное значение в эксплуатации, так как номинальный ток является нормированной величиной, а потери короткого замыкания хотя и не нормированы, однако существенно влияют на величину пускового вращающего момента двигателя. Опыт короткого замыкания воспроизводит пусковые условия двигателя и дает возможность проверить две весьма характерные для машины величины: пусковой ток и начальный момент.

При опыте к обмотке статора двигателя должно подводиться практически симметричное напряжение номинальной частоты. Замеряются: линейные напряжения — $U_{КЗ}$, линейные токи — $I_{КЗ}$, мощность — $P_{КЗ}$. Непосредственно после окончания опыта короткого замыкания и отключения машины измеряют сопротивление обмотки статора $R_{КЗ.Л}$ между двумя линейными выводами. Для

получения результатов повышенной точности измерительные приборы берутся со шкалами, отвечающими замеряемым величинам, а для измерения мощности рекомендуется использовать метод двух ваттметров. Опыт короткого замыкания делается при практически холодном состоянии машины, либо после опыта холостого хода.

Для его проведения двигатель включается коммутационным аппаратом на пониженное испытательное напряжение: 110 % от $U_и$ (это напряжение короткого замыкания). Затем делается отсчет (снимаются показания приборов). После этого проводятся еще 3–5 отсчетов при других меньших значениях подводимого напряжения.

Испытательное напряжение (В) в опыте короткого замыкания: $U_н$ — 127, 220, 380, 660; соответственно $U_и$ — 33, 58, 100, 173.

Длительность снятия показаний приборов для каждого отсчета не должна превышать 10 с во избежание чрезмерного нагревания обмотки током короткого замыкания. Сразу после каждого отсчета двигатель от источника питания отключается.

После эксперимента строятся зависимости $I_{кз}$, $P_{кз}$, $\cos\varphi_{кз}$, $M_{кз}$ от напряжения $f(U_{кз})$*.

В общем виде $I_{кз} = f(U_{кз})$ не имеет прямолинейного характера из-за насыщения магнитопровода. Однако на практике зависимость между током короткого замыкания и приложенным к обмотке электродвигателя напряжением часто принимают прямолинейной. Это позволяет проводить опыт короткого замыкания при напряжении, отличном от номинального. Поэтому ток короткого замыкания ($I_{кз}$) при номинальном напряжении ($U_н$), называемый номинальным пусковым током, можно определить по формуле (А)

$$I_{кз} = \frac{U_н}{U'^{*}_{кз}} \cdot I'^{*}_{кз},$$

где $I'_{кз}$ — ток короткого замыкания в эксперименте, снятый при подведенном к двигателю пониженном напряжении $U'_{кз}$, А.

Коэффициент мощности короткого замыкания находится из выражения

---

* Если симметрия системы линейных напряжений ($U'_{кз}$) нарушена, действительные величины $U^{*}_{кз}$ и $I^{*}_{кз}$ определяются аналогично, как при опыте холостого хода (85), (86).

$$\cos\varphi_{КЗ} = \frac{P_{КЗ} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{КЗ} \cdot I_{КЗ}},$$

где $P_{КЗ}$ — потребляемая мощность короткого замыкания, кВт; $U_{КЗ}$ — линейное напряжение короткого замыкания, подводимое к двигателю при эксперименте, В; $I_{КЗ}$ — линейный ток короткого замыкания (среднеарифметический), А.

Вращающий момент при коротком замыкании замеряется или рассчитывается но формуле, Н·м:

$$M_{КЗ} = 9550 \cdot K_{ЭК} \frac{P_{ЭК}}{n_{С}},$$

где $K_{ЭК}$ — коэффициент, учитывающий уменьшение $M_{КЗ}$ за счет добавочных потерь, $K_{ЭК} = 0{,}9$ (по ГОСТу); $n_{С}$ — синхронная частота вращения магнитного поля, мин$^{-1}$; $P_{ЭК}$ — электромагнитная мощность или потери в роторе, кВт:

$$P_{ЭК} = P_{КЗ} - P_{МС} - P_{СТ},$$

где $P_{СТ}$ — потери в стали магнитопровода, кВт. Берутся по данным опыта холостого хода при напряжении, равном напряжению короткого замыкания; $P_{МС}$ — потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания, находятся из выражения, кВт:

$$P_{МС} = 1{,}5 \cdot I_{КЗ}^2 \cdot R_{КЗ.Л} \cdot 10^{-3},$$

где $R_{КЗ.Л}$ — сопротивление обмотки статора между двумя линейными выводами, Ом.

Потери короткого замыкания в обмотке ротора (электромагнитные потери) $P_{ЭК}$ пропорциональны развиваемому им вращающему моменту. Начальный пусковой вращающий момент при коротком замыкании $M_{КЗ.Н}$, соответствующий номинальному напряжению, определяется по формуле, Н·м:

$$M_{КЗ.Н} = \left(\frac{I_{КЗ.Н}}{I_{К.З}}\right)^2 M_{КЗ},$$

где $M_{КЗ}$ — вращающий момент (Н·м), измеренный или рассчитанный при наибольшем напряжении опыта короткого замыкания.

Полученные зависимости $I_{КЗ}$, $P_{КЗ}$, $\cos\varphi_{К}$, $M_{КЗ} = f(U_{КЗ})$ сравниваются с данными заводов-изготовителей.

*Однако в ремонтной практике, как правило, проводят сравнения с заводскими данными только двух величин: тока — $I_{КЗ}$ и потерь — $P_{КЗ}$, снятых при испытательном напряжении. Указанные показатели не должны отличаться от заводских более чем: силы тока — на 10 %, потерь короткого замыкания — на 15 %.* При больших отклонениях проводится анализ причин.

*Ток короткого замыкания* электродвигателей является нормированной величиной и равен номинальному. Главную роль в отклонении его величины от нормированной играют: несоответствие числа витков обмотки статора расчетному значению, наличие неисправности в обмотке ротора.

Наибольшая *величина кратности пускового тока* относительно номинального для небольших электродвигателей (до 100 кВт) должна находиться в пределах 5–7.

*Потери короткого замыкания* для электрических машин ГОСТами не нормированы, но они влияют на величину пускового вращающего момента. Существенно влияют на значения потерь короткого замыкания отступления в числе витков обмотки статора от расчетной, изменения в сечениях обмоточных проводов статорной обмотки, неисправности в обмотке ротора.

Опыт короткого замыкания позволяет проверить пайки в обмотках, а также выявить обрывы стержней беличьих клеток короткозамкнутых роторов. В последнем случае токи короткого замыкания будут неодинаковыми по фазам и изменяться при проворачивании ротора.

## 18.8. Определение коэффициента трансформации двигателя с фазным ротором

Цель испытания – *определение соответствия между числом витков в обмотках статора и ротора*.

Испытательное напряжение (при приемосдаточных испытаниях допустимо менее номинального) подводится к фазным обмоткам статора при неподвижном роторе машины и разомкнутой его обмотке. Замеряются линейные напряжения на зажимах обмоток статора и на кольцах ротора.

# ЛИТЕРАТУРА

*Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. Л., 1985.

*Ватурин В.А.* Обмотки асинхронных двигателей. М., 1978.

*Гемке Р.Г.* Неисправности электрических машин. Л., 1989.

*Жерве Г.К.* Обмотки электрических машин. Л., 1989.

*Жерве Г.К.* Расчет асинхронного двигателя при перемотке. Л., 1976.

*Маршак Е.Л., Уманцев Р.Б.* Ремонт электрических машин общепромышленного применения. М., 1972.

Правила устройства электроустановок. М., 1998.

Правила эксплуатации электроустановок потребителей. М., 2000.

*Пястолов А.А.* Научные основы эксплуатации электросилового оборудования. М., 1968.

*Пястолов А.А., Мешков А.А., Вахрамеев А.Л.* Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования. М., 1981.

*Пястолов А.А., Шац Е.Л., Блюмберг В.А.* Эксплуатация и ремонт электрооборудования. М., 1966.

*Рубо Л.Г.* Пересчет и ремонт асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт. М.; Л., 1961.

*Русан В.И.* и др. Прогрессивные технологии ЭМР в АПК. М., 1989.

*Русан В.И.* и др. Справочник по монтажу электроустановок. М., 1986.

*Русан В.И., Сорокин Э.П.* Электромеханизация малых ферм. Мн., 1992.

*Сердешнов А.П.* Расчет трехфазного асинхронного двигателя при ремонте и модернизации. Мн., 2003.

*Сердешнов* и др. Методические указания к лабораторным работам «Эксплуатация и ремонт электрооборудования». Мн., 1997–2004.

*Сердешнов А.П., Янукович Г.И.* Техобслуживание и ремонт электрооборудования в сельском хозяйстве. Мн., 1993.

Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий. М., 1987.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

*Приложение 1*

**Результаты расчетов обмоток асинхронного двигателя на ЭВМ**

| Варианты расчетов | Показатели | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $B_\delta$, Тл | $B_Z$, Тл | $B_C$, Тл | $W_ф$, шт. | $N_п$, шт. | $W_{1сек}$, шт. | $К_Т$ | $П_{р\ гост}$, мм$^2$ |
| 1. Двухслойная обмотка при $U_Ф = 220$ В, $f = 50$ Гц<br>1.1. $n = 3000$ мин$^{-1}$ | | | | | | | | |
| 1.2. $n = 1500$ мин$^{-1}$ | | | | | | | | |
| 1.3. $n = 1000$ мин$^{-1}$ | | | | | | | | |
| 1.4. $n = 750$ мин$^{-1}$ | | | | | | | | |
| 1.5. при заданных условиях и $U_Ф = 127$ В | | | | | | | | |
| 1.6. при заданных условиях и $f = 60$ Гц | | | | | | | | |
| 2. Однослойная обмотка при заданных условиях | | | | | | | | |

| Варианты расчетов | Показатели | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $l_В$, м | $G'$, кг | $R$, Ом | $P'_Н$, кВт | $j$, А/мм$^2$ | А, А/м | $G/P'_Н$ |
| 1. Двухслойная обмотка при $U_Ф = 220$ В, $f = 50$ Гц<br>1.1. $n = 3000$ мин $^{1}$ | | | | | | | |
| 1.2. $n = 1500$ мин$^{-1}$ | | | | | | | |
| 1.3. $n = 1000$ мин$^{-1}$ | | | | | | | |
| 1.4. $n = 750$ мин$^{-1}$ | | | | | | | |
| 1.5. при заданных условиях и $U_Ф = 127$ В | | | | | | | |
| 1.6. при заданных условиях и $f = 60$ Гц | | | | | | | |
| 2. Однослойная обмотка при заданных условиях | | | | | | | |

*Приложение 2*

**Задание обмотчику** (*с примером*)

| № | Наименование | Статор |
|---|---|---|
| 1 | Тип двигателя | 4А160М4У3 |
| 2 | Номинальная мощность, кВт | 18 |
| 3 | Номинальное напряжение, В | 220/380 |
| 4 | Номинальный ток, А | 34,5/20,3 |
| 5 | Частота вращения номинальная, мин $^{-1}$ | 1500 |
| 6 | Частота тока, Гц | 50 |
| 7 | Схема соединения | Δ/Y |
| 8 | cosφ | 0,88 |
| 9 | η, % | 89,5 |
| 10 | Тип обмотки | петлевая, двухслойная |
| 11 | Масса провода, кг | 19,5 |
| 12 | Марка и сечение провода | $\text{ПЭВ-2} \times 1{,}77 \times 2 \times \frac{1{,}50}{1{,}61}$ |
| 13 | Число параллельных сечений, шт. | 2 |
| 14 | Число витков в секции, шт. | 96 |
| 15 | Число секций в катушке, шт. | 3 |
| 16 | Длина витка, м | 0,82 |
| 17 | Количество катушек, шт. | 12 |
| 18 | Шаг обмотки, шт. | 7 |
| 19 | Число параллельных ветвей, шт. | 1 |

Составил студент 3-го курса
(должность)

______________________________
(фамилия, имя, отчество)

15. 02. 05

______________________
(подпись)

## *Приложение 3*

**Синтетические пленки**

| Наименование и марка пленки | Толщина, мкм | $E_{пр}$, кВ/мм | Нагревостойкость, °С | Внешний вид |
|---|---|---|---|---|
| Триацетатцеллюлозная | 25, 40, 70 | 80–135 | 120 | Непластифицированная голубого цвета; слабопластифицированная бесветная |
| Полиэтилентерефталатная (лавсановая) (ПЭТФ) | 8, 10, 12, 15, 25, 35, 40, 50, 70, 100, 125, 190, 250 | 70–180 | 155 | Глянцевая без складок, поверхностных загрязнений и заусенцев |
| Полиамидная (ПМ) | 30, 40, 50, 60, 100, 130 | 50–150 | 220 | От темно-желтого до светло-коричневого цвета |
| Фторопластовая Ф 400 (электроизоляционная ориентированная) | 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 | Не менее 120 | 260 | Белого цвета, полупрозрачная или матовая без складок, трещин и отверстий |
| Фторопластовая Ф-4ЭН (электроизоляционная неориентированная) | 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 130, 140, 150 | Не менее 45 | 260 | — |

## *Приложение 4*

**Композиционные материалы на основе синтетических пленок**

| Наименование и марка пленки | Толщина δ, мм | $E_{пр}$, кВ/мм | Нагревостойкость, °С |
|---|---|---|---|
| Пленкосинтокартон ПСК–ЛП | 0,25 – 0,52 | 40 | 130 |
| Пленкосинтокартон ПСК–Ф | 0,22 – 0,46 | 40 | 155 |
| Пленкослюдопласт ГИП–ЛСП–ПЛ | 0,35; 0,40; 0,45 | 25–30 | 155 |
| Пленкасбестокартон | 0,3; 0,35 | 25– | 130 |
| Изофлекс | 0,13; 0,15; 0,17; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,45; 0,50 | 25–100* | 130 |
| Изофлекс – 3, – 3Н | 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40 | 40 | 180 |
| Имидофлекс | 0,10; 0,13; 0,15; 0,17; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50 | 20–100* | 180 |
| Имидофлекс – 5 | 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50 | 20–50* | 180 |

* Бóльшее значение для материала меньшей толщины.

*Приложение 5*

**Электроизоляционные лакоткани**

| Марка лакоткани | Основа лакоткани | Пропиточный состав | δ, мм | $U_{пр}$, кВ | Нагревостойкость, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| ЛХМ–100 | Хлопчатобумажная | Масляный лак | 0,15; 0,17; 0,24; 0,30 | 4,0–9,5 | до 105 |
| ЛШМ–105 | Шелковая | » | 0,08; 0,10; 0,12; 0,15 | 1,0–8,5 | до 105 |
| ЛКМ–105 | Капроновая | » | 0,10; 0,12; 0,15 | 3,6–7,8 | до 105 |
| ЛСМ–105/120 | Стеклянная | » | 0,15; 0,17; 0,20; 0,24 | 3,2–8,0 | до 120 |
| ЛСБ–105/120 | » | Битум-масло-алкидный лак | 0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24 | 2,6–10 | до 130 |
| ЛСК–105/120 | » | Кремний-органич. лак | 0,06; 0,08; 0,10 | 1,2–9,0 | до 180 |

*Приложение 6*

**Электроизоляционные бумаги и картоны**

| Материал | Марка | δ, мкм | $E_{пр}$, кВ/мм | Общая характеристика |
|---|---|---|---|---|
| Бумага кабельная | К–120 | 120 | 10,0–12,0 | Применяется в изоляции маломощн. эл. машин |
| Картон электроизоляционный для работы в воздушной среде | ЭВС | 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 12,0 | | Применяется в изоляции эл. машин средней и большой мощностей. Марки ЭВП и ЭВТ только в рулонах |
| | ЭВП | 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 | 12,0 | |
| | ЭВТ | То же; 0,4; 0,5 | 12,0 | |

## *Приложение 7*

**Ленты электроизоляционные из стеклянных нитей**

| Марка | Толщина, мм | Интервал ширины, мм | Разрывная нагрузка по основе, Н | Линейная плотность, г/100 м |
|---|---|---|---|---|
| ЛЭС | 0,08 | 10–40 | 235–785 | 95–385 |
| ЛЭС | 0,10 | 10–50 | 294–1128 | 106–565 |
| ЛЭСБ | 0,10 | 15–40 | 491–981 | 180–460 |
| ЛЭС | 0,15 | 10–50 | 392–1373 | 165–810 |
| ЛЭСБ | 0,15 | 15–40 | 598–1275 | 255–660 |
| ЛЭС | 0,20 | 10–50 | 491–2060 | 230–1090 |
| ЛЭСБ | 0,20 | 15–50 | 883–2256 | 330–1050 |
| ЛЭСБ | 0,25 | 15–40 | 981–2208 | 410–1020 |

**Примечание.** Ленты вырабатываются полотняным переплетением на челночных (ЛЭС) и бесчелночных (ЛЭСБ) станках. Ширина лент 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 мм.

## *Приложение 8*

**Шнур-чулок стеклянный**

| Марка шнур-чулка | Внутренний диаметр, мм | Толщина стенки, мм | Масса 100 м, г | Разрывная нагрузка по основе, не менее, Н |
|---|---|---|---|---|
| АСЭЧ (б) – 1,0 | 1,0 | 0,30–0,35 | 115 | 18 |
| АСЭЧ (б) – 1,0 | 1,0 | 0,30–0,35 | 105 | 14 |
| АСЭЧ (б) – 2,0 | 2,0 | 0,30–0,35 | 180 | 28 |
| АСЭЧ (б) – 2,0 (промытый) | 2,0 | 0,30–0,35 | 162 | 16 |
| АСЭЧ (б) – 3,5 | 3,5 | 0,30–0,35 | 310 | 55 |
| АСЭЧ (б) –5,0 | 5,0 | 0,30–0,35 | 310 | 60 |
| АСЭЧ (б) –6,0 | 6,0 | 0,35–0,40 | 450 | 80 |
| АСЭЧ (б) – 8,0 | 8,0 | 0,35–0,40 | 448 | 85 |

**Электроизоляционные трубки**

| Марка | Внутренний диаметр, мм | Толщина стенки, мм | Характеристика трубки |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| ТЛВ | 0,5; 0,75; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,4; 4,0; 4,5; 5–10 | 0,5–0,9 | Хлопчатобумажные (линоксиловые), лакированные светлым масляным лаком, нагревостойкость 105°С |
| ТЛМ | | | То же, маслостойкие |
| ТПЛ | 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 8,0; 9,0; 10,0 | 0,4–0,8 | Из лавсанового шелка, пропитанные полиэфирным лаком. Маслостойкие. Нагревостойкость 105°С |
| ТЭЛ | 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5–10 | 0,4; 0,5 | То же, но с нагревостойкостью 130°С |
| ТЭС | 1,5; 1,7; 2,0; 2,5; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0 | 0,4; 0,5 | Из стеклянных нитей, пропитанных эпоксидно-полиэфирным лаком. Нагревостойкость 130°С |
| ТКС | 1,5; 1,7; 2,0; 2,5; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0 | 0,4; 0,5 | Из стеклянных нитей, пропитанных кремнийорганическим лаком. Нагревостойкость 180°С |
| ТКСП | 1–8 | 0.65–0,9 | Трубки из стеклянных нитей с нанесенным на их поверхность слоем кремнийорганической резины. Нагревостойкость 180°С |
| ТРФ | 1,2; 1,7; 2,2; 2.8; 3.8; 4,3; 4,8; 5,3; 6,4; 7,4; 8,4; 10,0 | 0,6–0,9 | Трубки из фторорганической резины. Нагревостойкость 180°С |
| ТКР | 1,0; 1,5; 2,5; 3,0; 3,5; 4,5; 5,0; 8,0; 10,0; 12,0; 14,0; 16,0 | 0,9–2,5 | Трубки из кремнийорганической резины. Нагревостойкость 180°С |
| Трубки Ф4Д и Ф4ДМ | 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 0,7; 0,8; 1,0–10 | 0,2–1,5 | Трубки из фторопласта Ф4Д и Ф4ДМ. Нагревостойкость 180°С |

**Примечание.** Пробивное напряжение трубок после 24 ч пребывания во влажной атмосфере не менее 2 кВ. Минимальная длина трубки 1 м.

**Характеристики обмоточных проводов**

| Марка | Характеристика изоляции | Класс нагревостойкости | Диаметр, мм |
|---|---|---|---|
| ПЭЛ | Лак на масляной основе | *A* | 0,02–2,50 |
| ПЭВ – 1 | Уменьшенная толщина, лак на поливинилацеталеновой основе | *A* | 0,02–2,50 |
| ПЭВ – 1 | Номинальная толщина, лак на поливинилацеталеновой основе | *A* | 0,05–2,50 |
| ПЭМ – 1 | Лак ВЛ – 941 | *A* | 0,05–2,50 |
| ПЭМ – 2 | Повышенная толщина, лак ВЛ – 941 | *A* | 0,05–2,50 |
| ПЭТВ – 2 | Эмаль на основе полиэфирных лаков | *B* | 0,06–2,50 |
| ПЭТ – 155 | Теплостойкий лак на полиэфиримидной основе | *F* | 0,06–2,50 |
| ПЭШО | Лак и один слой шелковых нитей | *A* | 0,05–1,56 |
| ПЭЛО | Лак и один слой полиэфирных нитей | *A* | 0,20–1,32 |
| ПЭБО | Лак и один слой х/б пряжи | *A* | 0,38–2,12 |
| ПБД | Два слоя нитей из х/б пряжи | *A* | 0,355–5,30 |
| ПСД | Стеклянные нити, наложенные двумя слоями с подклейкой и пропиткой нагревостойкими лаками | *F* | 0,74–5,20 |
| ПСД – Л | То же, но с поверхностным лаковым слоем | *F* | 1,00–5,20 |
| ПСД – Т | То же, но с уменьшенной толщиной | *F* | 0,315–2,12 |
| ПСДТ – Л | То же, но с поверхностным лаковым слоем | *F* | 0,315–2,12 |
| ПСДК | Стеклянные нити, наложенные двумя слоями с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком | *H* | 0,74–5,20 |
| ПСДК – Л | То же, но с поверхностным лаковым слоем | *H* | 1,00–5,20 |
| ПСДКТ | То же, но с уменьшенной толщиной | *H* | 0,315–2,12 |
| ПСДКТ–Л | Бесщелочное стекловолокно, наложенное двумя слоями с подклейкой и пропиткой термореактивным лаком | *H* | 0,315–2,12 |

## *Приложение 11*

**Диаметр круглых медных проводов с эмалевой изоляцией**

Обозначения: $d_{ГОСТ}$ – диаметр проволоки без изоляции, мм; $d'_{ГОСТ}$ – наружный диаметр провода с изоляцией, мм.

| $d_{ГОСТ}$ | $d'_{ГОСТ}$ – для марок | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ПЭВ – 2 | ПЭМ – 2 | ПЭТ – 155 | ПЭТВ – 2 | ПЭТВМ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0,050 | 0,080 | 0,080 | – | – | – |
| 0,060 | 0,090 | 0,090* | 0,090 | 0,084 | – |
| 0,063 | 0,090 | 0,093 | 0,090 | 0,084 | – |
| 0,070 | – | 0,100* | – | – | – |
| 0,071 | 0,100 | 0,101 | 0,100 | 0,094 | – |
| 0,080 | 0,110 | 0,110 | 0,110 | 0,104 | – |
| 0,090 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,116 | – |
| 0,100 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,128 | – |
| 0,110 | – | 0,140* | 0,140 | – | – |
| 0,112 | 0,140 | 0,142 | – | 0,140 | – |
| 0,120 | 0,150 | 0,150* | 0,150 | 0,150 | – |
| 0,125 | 0,155 | 0,155 | 0,155 | 0,154 | – |
| 0,130 | 0,160 | 0,160* | 0,160 | 0,160 | – |
| 0,140 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | – |
| 0,150 | 0,190 | 0,190* | 0,190 | 0,190 | – |
| 0,160 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,198 | – |
| 0,170 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | – |
| 0,180 | 0,220 | 0,220 | 0,220 | 0,220 | – |
| 0,190 | 0,230 | 0,230* | 0,230 | 0,230 | – |
| 0,200 | 0,240 | 0,240 | 0,240 | 0,240 | – |
| 0,210 | 0,250 | 0,260* | 0,260 | 0,250 | – |
| 0,224 | 0,270 | 0,264 | 0,270 | 0,264 | – |
| 0,230 | – | 0,280* | – | – | – |
| 0,236 | 0,285 | – | 0,285 | 0,286 | – |
| 0,250 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,310 |
| 0,265 | 0,315 | – | 0,315 | 0,314 | 0,325 |
| 0,270 | – | 0,320* | – | – | – |
| 0,280 | 0,330 | 0,330 | 0,330 | 0,330 | 0,340 |
| 0,290 | – | 0,340* | – | – | – |
| 0,300 | 0,350 | – | 0,350 | 0,350 | 0,360 |
| 0,310 | – | 0,360* | – | – | – |
| 0,315 | 0,365 | 0,365 | 0,365 | 0,364 | 0,375 |
| 0,330 | – | 0,380* | – | – | – |
| 0,335 | 0,385 | – | 0,385 | 0,384 | 0,395 |
| 0,350 | – | 0,410* | – | – | – |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,355 | 0,415 | 0,415 | 0,405 | 0,414 | 0,425 |
| 0,380 | 0,440 | 0,440* | 0,440 | 0,440 | 0,450 |
| 0,400 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,460 | 0,470 |
| 0,410 | – | 0,470* | – | – | – |
| 0,425 | 0,485 | – | 0,490 | 0,484 | 0,495 |
| 0,440 | – | 0,500* | – | – | – |
| 0,450 | 0,510 | 0,510 | 0,520 | 0,510 | 0,520 |
| 0,470 | – | 0,530* | – | – | – |
| 0,475 | 0,545 | – | 0,545 | 0,534 | 0,545 |
| 0,490 | – | 0,550* | – | – | – |
| 0,500 | 0,570 | 0,570 | 0,570 | 0,560 | 0,580 |
| 0,510 | – | 0,580* | – | – | – |
| 0,530 | 0,600 | 0,600* | 0,600 | 0,600 | 0,610 |
| 0,550 | – | 0,620* | – | – | – |
| 0,560 | 0,630 | 0,630 | 0,630 | 0,630 | 0,640 |
| 0,570 | – | 0,640* | – | – | – |
| 0,590 | – | 0,660* | – | – | – |
| 0,600 | 0,670 | – | 0,670 | 0,670 | 0,680 |
| 0,620 | – | 0,690* | – | – | – |
| 0,630 | 0,700 | 0,700 | 0,710 | 0,700 | 0,720 |
| 0,640 | – | 0,720* | – | – | – |
| 0,670 | 0,750 | 0,750* | 0,750 | 0,750 | 0,760 |
| 0,690 | 0,770* | 0,770* | 0,770 | 0,770* | 0,780* |
| 0,710 | 0,790 | 0,790 | 0,790* | 0,790 | 0,800 |
| 0,720 | – | 0,800* | – | – | – |
| 0,740 | – | 0,830* | – | – | – |
| 0,750 | 0,840 | 0,840 | 0,830 | 0,830 | 0,840 |
| 0,770 | 0,860* | 0,860* | 0,850* | 0,850* | 0,860* |
| 0,800 | 0,890 | 0,890 | 0,890 | 0,880 | 0,890 |
| 0,830 | 0,920* | 0,920* | 0,920* | 0,910* | 0,920* |
| 0,850 | 0,940 | 0,940 | 0,940 | 0,930 | 0,940 |
| 0,860 | – | 0,950* | – | – | – |
| 0,900 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,990 |
| 0,930 | 1,020 | 1,020* | 1,020* | 1,020* | 1,020* |
| 0,950 | 1,040* | 1,040* | 1,040 | – | 1,040 |
| 0,960 | – | 1,050* | – | 1,040 | – |
| 1,000 | 1,100 | 1,110 | 1,090 | 1,090 | 1,110 |
| 1,040 | – | 1,150* | – | – | – |
| 1,060 | 1,160 | 1,170 | 1,160 | 1,150 | 1,170 |
| 1,080 | 1,180* | 1,190* | 1,180* | 1,170* | 1,190* |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1,120 | 1,220 | 1,230 | 1,220 | 1,210 | 1,230 |
| 1,160 | – | 1,270* | – | – | – |
| 1,180 | 1,280 | 1,290 | 1,280 | 1,270 | 1,290 |
| 1,200 | – | 1,310* | – | – | – |
| 1,25 | 1,35 | 1,36 | 1,35 | 1,35 | 1,36 |
| 1,30 | – | 1,41* | – | – | – |
| 1,32 | 1,42 | 1,43 | 1,42 | 1,42 | 1,43 |
| 1,35 | – | 1,46 | – | – | – |
| 1,40 | 1,51 | 1,51 | 1,51 | 1,50 | – |
| 1,45 | 1,56* | 1,56* | 1,56* | 1,55* | – |
| 1,50 | 1,61 | 1,61 | 1,61 | 1,60 | – |
| 1,56 | 1,67* | 1,67* | 1,67* | 1,67* | – |
| 1,60 | 1,71 | 1,71 | 1,71 | 1,71 | – |
| 1,62 | – | 1,73* | – | – | – |
| 1,68 | – | 1,79* | – | – | – |
| 1,70 | 1,81 | 1,81 | 1,81 | 1,81 | – |
| 1,74 | – | 1,85* | – | – | – |
| 1,80 | 1,92 | 1,92 | 1,92 | 1,91 | – |
| 1,81 | – | 1,93* | – | – | – |
| 1,88 | – | 2,00* | – | – | – |
| 1,90 | 2,02 | 2,02 | 2,02 | 2,01 | – |
| 1,95 | – | 2,07* | – | – | – |
| 2,00 | 2,12 | 2,12 | 2,12 | 2,12 | – |
| 2,02 | – | 2,14* | – | – | – |
| 2,10 | – | 2,23* | – | – | – |
| 2,12 | 2,24 | 2,25 | 2,24 | 2,24 | – |
| 2,24 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,36 | – |
| 2,26 | – | 2,39* | – | – | – |
| 2,36 | 2,49 | 2,49 | 2,49 | 2,48 | – |
| 2,44 | 2,57* | 2,57* | 2,57* | 2,56* | – |
| 2,50 | 2,63 | 2,63 | 2,63 | 2,63 | – |

* В новых изделиях применять запрещается.

## Диаметр проводов со стекловолокнистой изоляцией

Обозначения: $d_{\text{ГОСТ}}$ – диаметр проволоки без изоляции, мм; $d'_{\text{ГОСТ}}$ – наружный диаметр провода с изоляцией, мм.

| $d_{\text{ГОСТ}}$ | $d'_{\text{ГОСТ}}$ – для марок | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ПСД, ПСДК | ПСДТ | ПСДКТ | ПСД – Л, ПСДК – Л | ПСДТ – Л | ПСДКТ – Л |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 0,315 | – | 0,500 | 0,460 | – | 0,480 | 0,480 |
| 0,335 | – | 0,520 | 0,480 | – | 0,500 | 0,500 |
| 0,355 | – | 0,540 | 0,500 | – | 0,520 | 0,520 |
| 0,380 | – | 0,570 | 0,530 | – | 0,550 | 0,550 |
| 0,400 | – | 0,590 | 0,550 | – | 0,570 | 0,570 |
| 0,425 | – | 0,620 | 0,580 | – | 0,600 | 0,600 |
| 0,450 | – | 0,640 | 0,600 | – | 0,620 | 0,620 |
| 0,475 | – | 0,670 | 0,620 | – | 0,650 | 0,650 |
| 0,500 | 0,740* | 0,690 | 0,650 | – | 0,670 | 0,670 |
| 0,530 | – | 0,730 | 0,700 | – | 0,700 | 0,700 |
| 0,560 | 0,820* | 0,760 | 0,730 | – | 0,730 | 0,730 |
| 0,600 | – | 0,800 | 0,770 | – | 0,770 | 0,770 |
| 0,630 | 0,890* | 0,830 | 0,800 | – | 0,800 | 0,800 |
| 0,670 | – | 0,870 | 0,840 | – | 0,840 | 0,840 |
| 0,690* | – | 0,890 | 0,860 | – | 0,860 | 0,860 |
| 0,710 | 0,980* | 0,930 | 0,890 | – | 0,890 | 0,890 |
| 0,750 | 1,020* | 0,970 | 0,930 | – | 0,930 | 0,930 |
| 0,770* | – | 0,990 | 0,950 | – | 0,950 | 0,950 |
| 0,800 | 1,070* | 1,020 | 0,980 | – | 0,980 | 0,980 |
| 0,830* | – | 1,050 | 1,010 | – | 0,980 | 0,980 |
| 0,850 | 1,120* | 1,070 | 1,030 | – | 1,030 | 1,030 |
| 0,900 | 1,170* | 1,120 | 1,080 | – | 1,080 | 1,080 |
| 0,930* | – | 1,150 | 1,110 | – | 1,110 | 1,110 |
| 0,950 | 1,220* | 1,170 | 1,130 | – | 1,130 | 1,130 |
| 1,000 | 1,290 | 1,230 | 1,200 | 1,290 | 1,220 | 1,220 |
| 1,060 | 1,359 | 1,230 | 1,260 | 1,350 | 1,280 | 1,280 |
| 1,080* | 1,370 | 1,310 | 1,280 | 1,370 | 1,300 | 1,300 |
| 1,120 | 1,410 | 1,350 | 1,320 | 1,410 | 1,340 | 1,340 |
| 1,180 | 1,470 | 1,410 | 1,380 | 1,470 | 1,400 | 1,400 |
| 1,250 | 1,540 | 1,480 | 1,450 | 1,540 | 1,470 | 1,470 |
| 1,320 | 1,610 | 1,550 | 1,520 | 1,610 | 1,540 | 1,540 |
| 1,400 | 1,690 | 1,630 | 1,600 | 1,690 | 1,620 | 1,620 |
| 1,450* | 1,740 | 1,680 | 1,650 | 1,740 | 1,670 | 1,670 |
| 1,500 | 1,790 | 1,730 | 1,700 | 1,790 | 1,720 | 1,720 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,560* | 1,850 | 1,790 | 1,760 | 1,850 | 1,780 | 1,780 |
| 1,600 | 1,890 | 1,850 | 1,840 | 1,890 | 1,850 | 1,850 |
| 1,700 | 1,990 | 1,950 | 1,940 | 1,990 | 1,950 | 1,920 |
| 1,800 | 2,090 | 2,050 | 2.040 | 2,090 | 2,050 | 2,020 |
| 1,900 | 2,190 | 2,150 | 2,140 | 2,190 | 2,150 | 2,120 |
| 2,000 | 2,290 | 2,250 | 2,240 | 2,290 | 2,250 | 2,220 |
| 2,120 | 2,410 | 2,370 | 2,360 | 2,410 | 2,370 | 2,340 |

* В новых изделиях применять запрещается.

**Технические данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А**

| Типоразмер электродвигателя | $P_{2ном}$, кВт | Электромагнитные нагрузки | | | Энергетические показатели | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | КПД при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | cosφ при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | |
| | | $B_\delta$, Тл | $A$, А/см | $J$, А/мм² | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 |
| *Синхронная частота вращения 3000 об/мин* | | | | | | | | | | | | | | |
| 4АА63В2У3 | 0,55 | 0,70 | 174 | 8,0 | 69,0 | 75,0 | 75,0 | 73,0 | 68,0 | 0,47 | 0,69 | 0,80 | 0,86 | 0,88 |
| 4А71А2У3 | 0,75 | 0,67 | 168 | 7,3 | 71,0 | 78,0 | 78,5 | 77,0 | 73,0 | 0,50 | 0,72 | 0,82 | 0,87 | 0,89 |
| 4А71В2У3 | 1,1 | 0,72 | 200 | 8,5 | 76,0 | 79,5 | 79,5 | 77,5 | 73,0 | 0,50 | 0,73 | 0,82 | 0,87 | 0,89 |
| 4А80А2У3 | 1,5 | 0,72 | 194 | 6,1 | 73,0 | 80,5 | 81,5 | 81,0 | 79,0 | 0,48 | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,87 |
| 4А80В2У3 | 2,2 | 0,73 | 218 | 6,5 | 77,0 | 83,0 | 83,5 | 83,0 | 81,0 | 0,51 | 0,73 | 0,83 | 0,87 | 0,89 |
| 4А90L2У3 | 3,0 | 0,68 | 233 | 6,4 | 80,0 | 85,5 | 85,5 | 84,5 | 82,0 | 0,58 | 0,78 | 0,85 | 0,88 | 0,89 |
| 4А100S2У3 | 4,0 | 0,67 | 232 | 5,2 | 80,0 | 86,0 | 88,0 | 86,5 | 85,0 | 0,60 | 0,80 | 0,86 | 0,89 | 0,90 |
| 4А100L2У3 | 5,5 | 0,68 | 247 | 5,6 | 82,5 | 87,5 | 88,0 | 87,5 | 86,0 | 0,65 | 0,83 | 0,88 | 0,91 | 0,91 |
| 4А112М2У3 | 7,5 | 0,70 | 252 | 5,7 | 78,0 | 85,5 | 87,5 | 87,5 | 86,5 | 0,56 | 0,74 | 0,83 | 0,88 | 0,89 |
| 4А132М2У3 | 11,0 | 0,71 | 248 | 5,9 | 80,0 | 87,0 | 88,0 | 88,0 | 87,0 | 0,65 | 0,82 | 0,87 | 0,90 | 0,90 |
| 4А160S2У3 | 15,0 | 0,72 | 335 | 6,3 | 80,0 | 86,5 | 88,0 | 88,0 | 87,0 | 0,68 | 0,84 | 0,89 | 0,91 | 0,91 |
| 4А160М2У3 | 18,5 | 0,70 | 355 | 6,5 | 82,0 | 87,5 | 88,5 | 88,5 | 87,0 | 0,72 | 0,86 | 0,90 | 0,92 | 0,92 |
| 4А180S2У3 | 22,0 | 0,78 | 387 | 5,6 | 79,0 | 86,0 | 88,5 | 88,5 | 88,0 | 0,65 | 0,82 | 0,88 | 0,91 | 0,92 |
| 4А180М2У3 | 30,0 | 0.79 | 366 | 5,2 | 82,0 | 88,5 | 90,5 | 90.5 | 89,0 | 0,65 | 0,82 | 0,88 | 0,90 | 0,90 |
| 4А200М2У30 | 37,0 | 0,82 | 403 | 4,8 | 81.0 | 87,5 | 90,0 | 90,0 | 89,5 | 0,67 | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 0,89 |
| 4А200L2У3 | 45,0 | 0,79 | 407 | 4,9 | 83,0 | 89,0 | 91,0 | 91,0 | 90,5 | 0,71 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,90 |

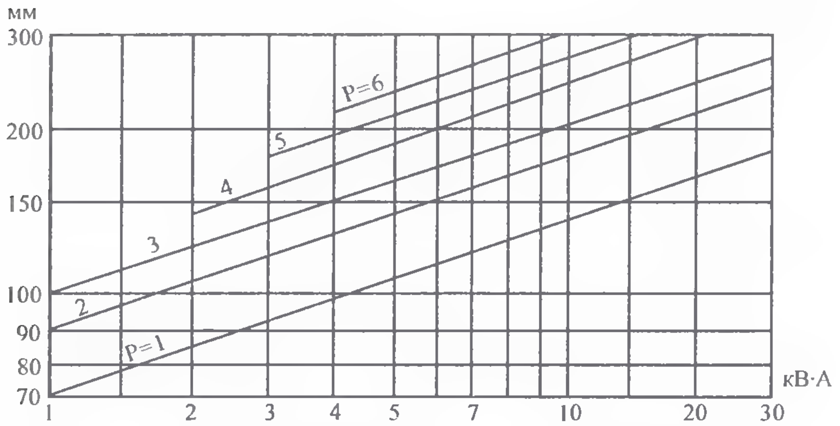
| Типоразмер электродвигателя | Параметры схемы замещения, отн. ед. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_\mu$ | в номинальном режиме | | | | при коротком замыкании | | |
| | | $R'_1$ | $X'_1$ | $R''_1$ | $X''_1$ | $R''_{2п}$ | $R_{к.п}$ | $X_{к.п}$ |
| 4АА63В2У3 | 2,5 | 0,13 | 0,049 | 0,096 | 0,083 | 0,097 | 0,23 | 0,12 |
| 4А71А2У3 | 2,6 | 0,12 | 0,052 | 0,064 | 0,077 | 0,065 | 0,19 | 0,11 |
| 4А71В2У3 | 2,8 | 0,13 | 0,054 | 0,069 | 0,084 | 0,070 | 0,20 | 0,11 |
| 4А80А2У3 | 2,5 | 0,084 | 0,051 | 0,049 | 0,081 | 0,050 | 0,13 | 0,099 |
| 4А80В2У3 | 2,7 | 0,076 | 0,050 | 0,049 | 0,087 | 0,050 | 0,13 | 0,098 |
| 4А90L2У3 | 3,4 | 0,072 | 0,057 | 0,047 | 0,10 | 0,048 | 0,12 | 0,11 |
| 4А100S2У3 | 3,4 | 0,054 | 0,055 | 0,036 | 0,099 | 0,038 | 0,091 | 0,11 |
| 4А100L2У3 | 3,8 | 0,050 | 0,054 | 0,036 | 0,11 | 0,038 | 0,087 | 0,10 |
| 4А112М2У3 | 3,7 | 0,046 | 0,058 | 0,028 | 0,14 | 0,032 | 0,077 | 0,15 |
| 4А132М2У3 | 4,2 | 0,040 | 0,061 | 0,025 | 0,12 | 0,028 | 0,068 | 0,12 |
| 4А160S2У3 | 4,0 | 0,052 | 0,092 | 0,022 | 0,12 | 0,029 | 0.081 | 0,16 |
| 4А160М2У3 | 4,5 | 0,049 | 0,092 | 0,022 | 0,12 | 0,030 | 0,079 | 0,16 |
| 4А180S2У3 | 3,6 | 0,039 | 0,091 | 0,020 | 0,11 | 0,026 | 0,065 | 0,15 |
| 4А180М2У3 | 3,8 | 0,030 | 0,073 | 0,018 | 0,11 | 0,024 | 0,054 | 0,13 |
| 4А200М2У30 | 4,1 | 0,029 | 0,094 | 0,021 | 0,12 | 0,031 | 0,060 | 0,16 |
| 4А200L2У3 | 4,9 | 0,027 | 0,088 | 0,020 | 0,13 | 0,031 | 0,058 | 0,15 |

| Типоразмер электродвигателя | $P_{2ном}$, кВт | Электромагнитные нагрузки | | | Энергетические показатели | | | | | | | | | | Параметры схемы замещения, отн. ед. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $B_\delta$, Тл | $A$, А/см | $J$, А/мм$^2$ | КПД при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | cosφ при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | $X_\mu$ | в номинальном режиме | | | | при коротком замыкании | | |
| | | | | | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | | $R'_1$ | $X'_1$ | $R''_1$ | $X''_1$ | $R''_{2п}$ | $R_{к.п}$ | $X_{к.п}$ |
| *Синхронная частота вращения 1500 об/мин* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4А71А4У3 | 0,55 | 0,93 | 188 | 6,9 | 55,0 | 67,0 | 70,5 | 70,5 | 67,0 | 0,29 | 0,46 | 0,59 | 0,70 | 0,75 | 1,6 | 0,13 | 0,086 | 0,11 | 0,20 | 0,11 | 0,24 | 0,23 |
| 4А71В4У3 | 0,75 | 0,97 | 225 | 8,5 | 58,5 | 70,0 | 73,0 | 72,0 | 68,5 | 0,33 | 0,50 | 0,64 | 0,73 | 0,79 | 1,5 | 0,11 | 0,084 | 0,11 | 0,20 | 0,11 | 0,23 | 0,22 |
| 4А80А4У3 | 1,1 | 0,84 | 218 | 7,6 | 64,0 | 74,0 | 76,0 | 75,07 | 72,0 | 0,38 | 0,59 | 0,73 | 0,81 | 0,85 | 1,7 | 0,12 | 0,078 | 0,068 | 0,12 | 0,071 | 0,20 | 0,14 |
| 4А80В4У3 | 1,5 | 0,82 | 231 | 8,0 | 70,0 | 78,0 | 73,5 | 7,0 | 73,0 | 0,41 | 0,63 | 0,76 | 0,83 | 0,86 | 1,9 | 0,12 | 0,078 | 0,069 | 0,12 | 0,072 | 0,19 | 0,15 |
| 4А90L4У3 | 2,2 | 0,88 | 233 | 7,6 | 74,0 | 81,0 | 81,5 | 80,0 | 76,5 | 0,42 | 0,64 | 0,76 | 0,83 | 0,85 | 2,1 | 0,098 | 0,076 | 0,060 | 0,13 | 0.063 | 0,16 | 0,14 |
| 4А100S4У3 | 3,0 | 0,90 | 246 | 6,6 | 75,5 | 82,0 | 83,0 | 82,0 | 79,5 | 0,43 | 0,65 | 0,77 | 0,83 | 0,85 | 2,2 | 0,078 | 0,079 | 0,053 | 0,13 | 0,057 | 0,14 | 0,14 |
| 4А100L4У3 | 4,0 | 0,87 | 254 | 6,3 | 79,5 | 84,5 | 85,0 | 84,0 | 81,5 | 0,46 | 0,68 | 0,79 | 0,84 | 0,86 | 2,4 | 0,067 | 0,079 | 0,053 | 0,14 | 0,058 | 0,13 | 0,15 |
| 4А112М4У3 | 5,5 | 0,85 | 248 | 7,1 | 82,0 | 86,5 | 86,5 | 85,5 | 83,0 | 0,51 | 0,72 | 0,80 | 0,85 | 0,85 | 2,8 | 0,064 | 0,078 | 0,041 | 0,13 | 0,048 | 0,11 | 0,14 |
| 4А132S4У3 | 7,5 | 0,90 | 252 | 5,9 | 77,5 | 86,0 | 87,5 | 87,5 | 86,0 | 0,53 | 0,71 | 0,83 | 0,86 | 0,87 | 3,0 | 0,048 | 0,085 | 0,033 | 0,13 | 0,040 | 0,088 | 0,15 |
| 4А132М4У3 | 11,0 | 0,89 | 264 | 6,1 | 80,0 | 86,0 | 88,0 | 87,5 | 87,0 | 0.55 | 0,75 | 0,84 | 0,87 | 0,88 | 3,2 | 0,043 | 0,085 | 0,032 | 0,13 | 0,039 | 0,082 | 0,15 |
| 4А160S4У3 | 15,0 | 0,72 | 314 | 5,7 | 86,0 | 89,5 | 89,5 | 88,5 | 86,5 | 0,63 | 0,81 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 4,0 | 0,047 | 0,086 | 0,025 | 0,13 | 0,038 | 0,085 | 0,15 |
| 4А160М4У3 | 18,5 | 0,69 | 310 | 5,5 | 87,5 | 90,5 | 90,5 | 89,5 | 87,5 | 0,66 | 0,82 | 0,86 | 0,88 | 0,88 | 4,3 | 0,042 | 0,085 | 0,024 | 0,13 | 0,037 | 0,079 | 0,14 |
| 4А180S4У3 | 22.0 | 0,74 | 333 | 5,4 | 85,5 | 89,5 | 90,0 | 90,0 | 87,0 | 0,65 | 0,82 | 0,87 | 0,90 | 0,90 | 4,0 | 0,041 | 0,080 | 0,021 | 0,12 | 0,034 | 0,076 | 0,15 |
| 4А180М4У3 | 30,0 | 0,79 | 335 | 5,5 | 87,0 | 90,5 | 91,0 | 91,0 | 89,0 | 0,66 | 0,83 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 3,9 | 0,034 | 0,068 | 0,018 | 0,12 | 0,031 | 0,064 | 0,13 |
| 4А200М4У3 | 37,0 | 0,76 | 368 | 5,9 | 87,0 | 90,5 | 91,0 | 91,0 | 90,5 | 0,67 | 0,84 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 4,4 | 0,039 | 0,086 | 0,018 | 0,14 | 0,035 | 0,074 | 0,16 |
| 4А200L4У3 | 45,0 | 0,73 | 362 | 5,6 | 88,5 | 92,0 | 92,5 | 92,0 | 91,0 | 0,69 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 4,6 | 0,034 | 0,082 | 0,017 | 0,14 | 0,034 | 0,069 | 0,16 |

| Типоразмер электродвигателя | $P_{2ном}$, кВт | Электромагнитные нагрузки | | | Энергетические показатели | | | | | | | | | | Параметры схемы замещения, отн. ед. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $B_\delta$, Тл | $A$, А/см | $J$, А/мм$^2$ | КПД при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | cos$\varphi$ при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | $X_\mu$ | в номинальном режиме | | | | при коротком замыкании | | |
| | | | | | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | | $R'_1$ | $X'_1$ | $R''_1$ | $X''_1$ | $R''_{2п}$ | $R_{к.п}$ | $X_{к.п}$ |
| *Синхронная частота вращения 1000 об/мин* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4А80А6У3 | 0,75 | 0,84 | 227 | 7,8 | 56,0 | 68,0 | 69,5 | 69,0 | 63,5 | 0,33 | 0,51 | 0,65 | 0,74 | 0,79 | 1,5 | 0,16 | 0,12 | 0,12 | 0,20 | 0,12 | 0,28 | 0,25 |
| 4А80В6У3 | 1,1 | 0,80 | 223 | 7,3 | 53,0 | 73,5 | 75,0 | 74,0 | 69,0 | 0,33 | 0,52 | 0,65 | 0,74 | 0,78 | 1,6 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,19 | 0,11 | 0,23 | 0,25 |
| 4А90L6У3 | 1,5 | 0.85 | 223 | 7,1 | 65,5 | 75,0 | 76,0 | 75,0 | 71,0 | 0,33 | 0,53 | 0,66 | 0,74 | 0,77 | 1,8 | 0,11 | 0,11 | 0,088 | 0,21 | 0,093 | 0,20 | 0,23 |
| 4А100L6У3 | 2,2 | 0,81 | 231 | 6,3 | 74,0 | 81,5 | 82,0 | 81,0 | 78,0 | 0,32 | 0,53 | 0,66 | 0,73 | 0,76 | 1,9 | 0,090 | 0,11 | 0,067 | 0,21 | 0,073 | 0,16 | 0,22 |
| 4А112МА6У3 | 3,0 | 0,89 | 248 | 6,9 | 73,0 | 81,0 | 82,0 | 81,0 | 78,5 | 0,33 | 0,56 | 0.69 | 0,76 | 0,79 | 1,9 | 0,085 | 0,074 | 0,063 | 0,10 | 0,069 | 0,16 | 0,14 |
| 4А112МВ6У3 | 4,0 | 0,87 | 262 | 7,1 | 77.0 | 82,5 | 83,0 | 82,0 | 79,5 | 0,40 | 0,62 | 0,74 | 0,81 | 0,83 | 2,0 | 0,077 | 0,073 | 0,062 | 0,11 | 0,068 | 0,15 | 0,14 |
| 4А132S6У3 | 5,5 | 0,90 | 258 | 7,0 | 71,0 | 81,0 | 84,0 | 85,0 | 83,0 | 0,33 | 0,56 | 0,69 | 0,80 | 0,84 | 1,9 | 0,067 | 0,072 | 0,041 | 0,11 | 0,050 | 0,12 | 0,14 |
| 4А132М6У3 | 7,5 | 0,87 | 256 | 6,9 | 76,0 | 84,0 | 85,0 | 85,5 | 84,0 | 0,40 | 0,62 | 0,74 | 0,81 | 0,84 | 2,1 | 0,060 | 0,070 | 0,040 | 0,11 | 0,050 | 0,11 | 0,14 |
| 4А160S6У3 | 11,0 | 0,75 | 293 | 6,9 | 83,5 | 87,5 | 87,5 | 86,0 | 83,5 | 0,54 | 0,75 | 0,83 | 0,86 | 0,87 | 3,0 | 0,073 | 0,11 | 0,030 | 0,15 | 0,047 | 0,12 | 0,18 |
| 4А160М6У3 | 15,0 | 0,74 | 292 | 6,9 | 85,0 | 88,5 | 88,5 | 87,5 | 85,0 | 0,55 | 0,76 | 0,84 | 0,87 | 0,87 | 3,0 | 0,062 | 0,10 | 0,028 | 0,16 | 0,045 | 0,11 | 0,19 |
| 4А180М6У3 | 18,5 | 0,82 | 377 | 6,3 | 85,0 | 89,0 | 89,0 | 88,0 | 86,0 | 0,54 | 0,76 | 0,84 | 0,87 | 0,87 | 2,9 | 0,056 | 0,11 | 0,026 | 0,13 | 0,046 | 0,10 | 0,18 |
| 4А200М6У3 | 22,0 | 0,70 | 350 | 5,5 | 87,5 | 91,0 | 91,0 | 90,0 | 88,0 | 0,68 | 0,84 | 0,88 | 0,90 | 0,90 | 4,1 | 0,050 | 0,11 | 0,024 | 0,14 | 0,042 | 0,092 | 0,17 |
| 4А200L6У3 | 30,0 | 0,77 | 375 | 6,0 | 88,0 | 91,0 | 91,0 | 90,5 | 89,0 | 0,64 | 0,82 | 0,88 | 0,90 | 0,90 | 3,7 | 0,046 | 0,12 | 0,022 | 0,13 | 0,040 | 0,085 | 0,16 |
| 4А225М6У3 | 37,0 | 0,78 | 369 | 5,7 | 87,5 | 91,0 | 91,5 | 91,0 | 89,5 | 0,63 | 0,81 | 0,87 | 0,89 | 0.89 | 3,7 | 0.042 | 0,10 | 0.019 | 0.13 | 0,035 | 0,078 | 0,16 |
| 4А250S6У3 | 45,0 | 0,76 | 356 | 5,1 | 87,5 | 91,0 | 91,5 | 91,5 | 90,5 | 0,64 | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 0,89 | 3,8 | 0,037 | 0,090 | 0,015 | 0,14 | 0,032 | 0,069 | 0,16 |

| Типоразмер электродвигателя | $P_{2ном}$, кВт | Электромагнитные нагрузки | | | Энергетические показатели | | | | | | | | | | Параметры схемы замещения, отн. ед. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $B_{\delta}$, Тл | $A$, А/см | $J$, А/мм$^2$ | КПД при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | cosφ при $P_2/P_{2ном}$, % | | | | | $X_{\mu}$ | в номинальном режиме | | | | при коротком замыкании | | |
| | | | | | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | | $R'_1$ | $X'_1$ | $R''_1$ | $X''_1$ | $R''_{2п}$ | $R_{к.п}$ | $X_{к.п}$ |
| | *Синхронная частота вращения 750 об/мин* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4А90LA8У3 | 0,75 | 0,81 | 209 | 7,0 | 49,0 | 63,0 | 68,0 | 68,0 | 65,5 | 0,26 | 0,40 | 0,52 | 0,62 | 0,68 | 1,3 | 0,14 | 0,15 | 0,11 | 0,29 | 0,12 | 0,26 | 0,35 |
| 4А90LB8У3 | 1,1 | 0,81 | 225 | 7,3 | 55,0 | 67,5 | 70,5 | 70,0 | 66,0 | 0,30 | 0,46 | 0,59 | 0,68 | 0,73 | 1,4 | 0,13 | 0,15 | 0,11 | 0,30 | 0,12 | 0,24 | 0,35 |
| 4А100L8У3 | 1,5 | 0,87 | 248 | 6,4 | 62,0 | 73,0 | 75,0 | 74,0 | 70,0 | 0,26 | 0,44 | 0,57 | 0,65 | 0,69 | 1,5 | 0,11 | 0,16 | 0,093 | 0,32 | 0,10 | 0,21 | 0,35 |
| 4А112МА8У3 | 2,2 | 0,91 | 263 | 6,9 | 64,0 | 74,5 | 76,5 | 76,5 | 74,0 | 0,30 | 0,48 | 0,62 | 0,71 | 0,76 | 1,5 | 0,093 | 0,11 | 0,083 | 0,17 | 0,094 | 0,19 | 0,22 |
| 4А112МВ8У3 | 3,0 | 0,88 | 271 | 6,7 | 69,5 | 78,0 | 79,5 | 79,5 | 76,5 | 0,33 | 0,52 | 0,66 | 0,74 | 0,78 | 1,6 | 0,080 | 0,11 | 0,083 | 0,17 | 0,091 | 0,17 | 0,21 |
| 4А132S8У3 | 4,0 | 0,96 | 257 | 6,9 | 71,0 | 80,0 | 83,0 | 83,0 | 81,0 | 0,27 | 0,46 | 0,59 | 0,70 | 0,73 | 1,6 | 0,068 | 0,10 | 0,058 | 0,17 | 0,069 | 0,14 | 0,21 |
| 4А132М8У3 | 5,5 | 0,88 | 263 | 7,1 | 74,5 | 82,0 | 83,5 | 83,0 | 80,5 | 0,32 | 0,52 | 0,65 | 0,74 | 0,76 | 1,8 | 0,070 | 0,11 | 0,061 | 0,19 | 0,073 | 0,14 | 0,23 |
| 4А160S8У3 | 7,5 | 0,78 | 274 | 6,3 | 79,5 | 86,0 | 86,5 | 86,0 | 84,0 | 0,35 | 0,57 | 0,69 | 0,75 | 0,77 | 2,0 | 0,075 | 0,14 | 0,032 | 0,18 | 0,053 | 0,13 | 0,20 |
| 4А160М8У3 | 11,0 | 0,79 | 284 | 6,7 | 81,0 | 87,0 | 87,5 | 87,0 | 85,0 | 0,35 | 0,57 | 0,69 | 0,75 | 0,77 | 2,0 | 0,066 | 0,13 | 0,031 | 0,18 | 0,053 | 0,12 | 0,19 |
| 4А180М8У3 | 15,0 | 0,81 | 378 | 6,4 | 82,5 | 87,5 | 88,0 | 87,0 | 84,5 | 0,46 | 0,68 | 0,78 | 0,82 | 0,83 | 2,4 | 0,064 | 0,13 | 0,030 | 0,17 | 0,057 | 0,12 | 0,22 |
| 4А200М8У3 | 18,5 | 0,79 | 379 | 6,1 | 85,5 | 89,5 | 89,5 | 88,5 | 86,5 | 0,50 | 0,71 | 0,80 | 0,84 | 0,84 | 2,6 | 0,057 | 0,13 | 0,026 | 0,16 | 0,049 | 0,11 | 0,19 |
| 4А200L8У3 | 22,0 | 0,75 | 404 | 6,7 | 87,5 | 90,0 | 90,0 | 88,5 | 88,5 | 0,54 | 0,75 | 0,82 | 0,84 | 0,84 | 3,1 | 0,062 | 0,14 | 0,029 | 0,18 | 0,055 | 0,12 | 0,21 |
| 4А225М8У3 | 30,0 | 0,87 | 397 | 5,8 | 85,0 | 90,0 | 90,5 | 90,5 | 88,5 | 0,44 | 0,66 | 0,76 | 0,81 | 0,82 | 2,3 | 0,045 | 0,12 | 0,022 | 0,17 | 0,044 | 0,090 | 0,19 |
| 4А250S8У3 | 37,0 | 0,81 | 395 | 5,9 | 86,5 | 90,5 | 90,0 | 90,0 | 88,5 | 0,50 | 0,72 | 0,80 | 0,83 | 0,83 | 2,8 | 0,047 | 0,11 | 0,017 | 0,18 | 0,042 | 0,088 | 0,20 |
| 4А205М8У3 | 45,0 | 0,83 | 382 | 5,4 | 87,0 | 90,5 | 91,0 | 91,0 | 90,0 | 0,49 | 0,71 | 0,80 | 0,84 | 0,84 | 2,6 | 0,037 | 0,099 | 0,016 | 0,17 | 0,038 | 0,075 | 0,18 |

*Приложение 14*




Зависимость мощности асинхронного двигателя от внутреннего магнитопровода статора $S_{ДВ} = f(D)$ при различных $P$ (числе пар полюсов)

## Содержание

Учебное издание

Сердешиов Анатолий Петрович

# РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В 2 частях

Часть 1

# РЕМОНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Второе издание

Учебное пособие

Редактор *Л.А. Косенкова*
Компьютерная верстка *Н.Л. Смирнова*

Подписано в печать 21.04.2008. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,2. Уч.-изд. л. 16,5.
Тираж 500 экз. Заказ 349.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие
«Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь».
ЛИ № 02330/0056921 от 01.04.2004.
ЛП № 02330/0056683 от 29.03.2004.
220004, г. Минск, ул. Кальварийская, 17.
http://www.ivcmf.by e-mail: ivc@ivcmf.by

А. П. Сердешнов

# РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

## ремонт электрических машин

часть 1

